

**ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA FORMACIÓN DE INESTABILIDADES PLÁSTICAS EN
ESTRUCTURAS ANULARES METÁLICAS SOMETIDAS A UN PROCESO DE EXPANSIÓN
RADIAL**



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

Trabajo de fin de grado

Realizado por:

Diego Muñoz Leiva

Grado en Ingeniería Mecánica

Tutor responsable:

Jose Antonio Rodríguez Martínez

Departamento Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

PROYECTO:

Contenido

Resumen.....	8
1. Introducción	9
1.1 Motivación	9
2. Estado del arte	11
2.1 Visión inicial general.....	11
2.2 Dinámica de estricción y fragmentación.....	12
2.2.1 Desarrollo experimental.....	13
2.2.2 Fotografías de la expansión del anillo	14
3. Configuración numérica	24
4. Análisis y resultados	28
5. Discusión de resultados.....	38
5.1 Efecto de la geometría	38
5.2 Efecto del flujo de tensión	43
5.3 Efecto de la densidad	50
6. Conclusiones.....	52
7. Trabajos futuros	53
8. Referencias.....	54

Índice de figuras

Fig. 1 Proceso de mecanizado	9
Fig. 2 Avión en pleno vuelo.....	9
Fig. 3 Despegue de un caza	10
Fig. 4 Crucero por el Atlántico	10
Fig. 5 Puente.....	10
Fig. 6 Diagrama esquemático del experimento del anillo en expansión.	13
Fig. 7 Secuencia de imágenes que muestran la expansión de un anillo	14
Fig. 8 Anillo de Al 6061-O a $V=80\text{m/s}$	16
Fig. 9 Anillo de Al 6061-O a $V=150\text{m/s}$	17
Fig. 10 Imagen Zoom de uno de los casos anteriores.....	18
Fig. 11 Forma y dimensiones del anillo.....	24
Fig. 12 Condición de carga, coordenadas cilíndricas y partición	25
Fig. 13 Anillo mallado	26
Fig. 14 Zoom de la sección.....	26
Fig. 15 Anillo expandiéndose	28
Fig. 16 Leyenda.....	28
Fig. 17 Anillo deformado hasta alcanzar rotura	29
Fig. 18 Leyenda.....	29
Fig. 19 Gráfica que muestra la relación de la velocidad con las roturas y las estricciones.....	30
Fig. 20 Gráfica que muestra la influencia del tiempo a $V=50\text{ m/s}$. Leyenda mostrada en segundos.	32
Fig. 21 Gráfico que muestra la influencia del tiempo a $V=250\text{ m/s}$. Leyenda mostrada en segundos.	33
Fig. 22 Gráfica con configuración inicial a $V=5\text{m/s}$	35
Fig. 23 Gráfica con configuración inicial a $V=15\text{m/s}$	35
Fig. 24 Gráfica con configuración inicial a $V=25\text{m/s}$	35
Fig. 25 Gráfica con configuración inicial a $V=50\text{m/s}$	35
Fig. 26 Gráfica con configuración inicial a $V=75\text{m/s}$	35
Fig. 27 Gráfica con configuración inicial a $V=100\text{m/s}$	35
Fig. 28 Gráfica con configuración inicial a $V=150\text{m/s}$	36
Fig. 29 Gráfica con configuración inicial a $V=200\text{m/s}$	36
Fig. 30 Gráfica con configuración inicial a $V=250\text{m/s}$	36
Fig. 31 Gráfica con configuración inicial a $V=300\text{m/s}$	36
Fig. 32 Gráfica de sección menor a $V=5\text{m/s}$	40
Fig. 33 Gráfica de sección menor a $V=15\text{m/s}$	40
Fig. 34 Gráfica de sección menor a $V=25\text{m/s}$	40
Fig. 35 Gráfica de sección mayor a $V=5\text{m/s}$	40
Fig. 36 Gráfica de sección mayor a $V=15\text{m/s}$	40
Fig. 37 Gráfica de sección mayor a $V=25\text{m/s}$	40
Fig. 38 Gráfica de sección menor a $V=50\text{m/s}$	41
Fig. 39 Gráfica de sección menor a $V=75\text{m/s}$	41
Fig. 40 Gráfica de sección menor a $V=100\text{m/s}$	41
Fig. 41 Gráfica de sección mayor a $V=50\text{m/s}$	41
Fig. 42 Gráfica de sección mayor a $V=75\text{m/s}$	41
Fig. 43 Gráfica de sección mayor a $V=100\text{m/s}$	41
Fig. 44 Gráfica de sección menor a $V=150\text{m/s}$	42
Fig. 45 Gráfica de sección menor a $V=200\text{m/s}$	42
Fig. 46 Gráfica de sección menor a $V=300\text{m/s}$	42

Introducción

Fig. 47 Gráfica de sección mayor a $V=150\text{m/s}$	42
Fig. 48 Gráfica de sección mayor a $V=200\text{m/s}$	42
Fig. 49 Gráfica de sección mayor a $V=300\text{m/s}$	42
Fig. 50 Gráfica con $\sigma=200\text{MPa}$ a $V=5\text{m/s}$	45
Fig. 51 Gráfica con $\sigma=200\text{MPa}$ a $V=15\text{m/s}$	45
Fig. 52 Gráfica con $\sigma=200\text{MPa}$ a $V=25\text{m/s}$	45
Fig. 53 Gráfica con $\sigma=1000\text{MPa}$ a $V=5\text{m/s}$	45
Fig. 54 Gráfica con $\sigma=1000\text{MPa}$ a $V=15\text{m/s}$	45
Fig. 55 Gráfica con $\sigma=1000\text{MPa}$ a $V=25\text{m/s}$	45
Fig. 56 Gráfica con $\sigma=200\text{MPa}$ a $V=50\text{m/s}$	46
Fig. 57 Gráfica con $\sigma=200\text{MPa}$ a $V=75\text{m/s}$	46
Fig. 58 Gráfica con $\sigma=200\text{MPa}$ a $V=100\text{m/s}$	46
Fig. 59 Gráfica con $\sigma=1000\text{MPa}$ a $V=50\text{m/s}$	46
Fig. 60 Gráfica con $\sigma=1000\text{MPa}$ a $V=75\text{m/s}$	46
Fig. 61 Gráfica con $\sigma=1000\text{MPa}$ a $V=100\text{m/s}$	46
Fig. 62 Gráfica con $\sigma=200\text{MPa}$ a $V=150\text{m/s}$	47
Fig. 63 Gráfica con $\sigma=200\text{MPa}$ a $V=200\text{m/s}$	47
Fig. 64 Gráfica con $\sigma=200\text{MPa}$ a $V=300\text{m/s}$	47
Fig. 65 Gráfica con $\sigma=1000\text{MPa}$ a $V=150\text{m/s}$	47
Fig. 66 Gráfica con $\sigma=1000\text{MPa}$ a $V=200\text{m/s}$	47
Fig. 67 Gráfica con $\sigma=1000\text{MPa}$ a $V=300\text{m/s}$	47
Fig. 68 Gráfica de variación del límite elástico manteniendo el resto de parámetros con $V=200\text{ m/s}$	49
Fig. 69 Gráfica de variación de la densidad manteniendo el resto de parámetros con $V=200\text{m/s}$	51

Índice de tablas

Tabla 1: Historia de la expansión de anillos23
Tabla 2 Propiedades de la configuración de referencia.....27
Tabla 3 Tabla resumen de los efectos producidos52

Resumen

En el presente trabajo se estudia el comportamiento mecánico de materiales metálicos en condiciones dinámicas.

La condición dinámica consistirá en una expansión radial de un anillo a altas velocidades de deformación. Estas velocidades de deformación variarán desde valores cercanos a 200 s^{-1} hasta valores de 10.000 s^{-1} . El objetivo de esta expansión es analizar la formación de las inestabilidades y fractura que se generan a lo largo del mismo. Al no tener la posibilidad de realizar estos ensayos de forma experimental, se realizarán estas simulaciones mediante elementos finitos.. Para ser capaces de realizarlas se utilizará el programa de elementos finitos, ABAQUS/Explicit.

Con el fin de entender mejor todos los supuestos de este proyecto y tener una visión más global del mismo, lo primero que se mostrará será una breve explicación del ensayo experimental de la expansión de un anillo.

Justo después de mostrar dicha explicación se expondrá un breve resumen sobre las investigaciones realizadas a lo largo de la historia así como de los avances conseguidos con el fin de poder tener una visión global de los estudios realizados y ver que es lo que podemos aportar con este trabajo.

Para ser capaces de analizar los resultados obtenidos en las simulaciones llevadas a cabo se utilizará el desarrollo teórico expresado por Vadillo et al. (2012). De esta manera se podrá demostrar el dominio de los parámetros influyentes en la inercia y estabilidad del anillo.

1. Introducción

1.1 Motivación

Para saber qué puede proporcionar el estudio de la expansión radial de un anillo a altas velocidades de deformación debemos echar un vistazo a la forma de actuar por parte de la industria y llegar a saber si se puede aportar algún tipo de mejora con estos estudios.

Exhaustivos análisis de la deformación de los metales y el fallo en su comportamiento promueven la necesidad de mostrar a los sectores industriales el modo de comportamiento tanto de cargas mecánicas como termodinámicas. Este motivo nos incita a estudiar a fondo el comportamiento mecánico de los metales en las condiciones antes comentadas.

En la actualidad, la industria utiliza las simulaciones numéricas como una potente herramienta con la que se reduce el número de ensayos. La consecuencia de esta reducción es un ahorro de tiempo y dinero en campañas experimentales.

Para propósitos de diseño tanto en campos de aeronáutica, como automoción, procesos de mecanizado o aplicaciones militares se requiere un conocimiento preciso del comportamiento termo-viscoplástico de los metales.

Últimamente se está dando una mayor importancia a todo tipo de procesos sometidos a altas velocidades de deformación por lo que la industria moderna se está preocupando cada vez más por este tipo de actividades promoviendo una mayor inquietud en el área ingenieril.

En el diseño de estructuras expuestas al aire libre se tiene en cuenta las cargas accidentales, tales como caídas de objetos, colisiones, explosiones y penetración de fragmentos.

En la industria del transporte, la absorción de la energía y la resistencia a los choques son los principales objetivos en el proceso de diseño de vehículos, buques, aeronaves...etc. Además, muchos de los problemas descubiertos en el impacto estructural son también importantes en los procesos de mecanizado y en operaciones de conformado de metales.

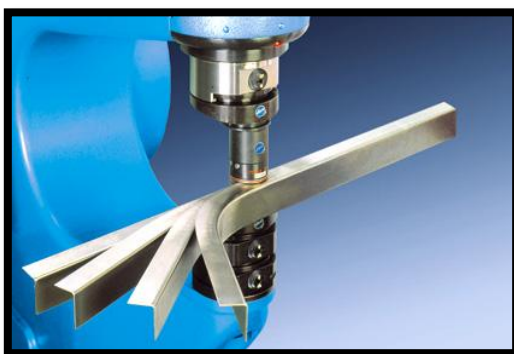


Fig. 1 Proceso de mecanizado



Fig. 2 Avión en pleno vuelo



Fig. 3 Despegue de un caza



Fig. 4 Crucero por el Atlántico



Fig. 5 Puente

El estudio de la plasticidad de los metales ha sido ampliamente estudiado en las últimas décadas. Los trabajos pioneros de Orowan y Taylor proporcionaron una descripción de la deformación de los metales en términos de la teoría de dislocaciones. Más adelante, los trabajos de *Perzyna (1966)*, *Campbell y Fergusson (1970)* y *Kocks(1975)* entre otros, fueron claves para conocer mejor el comportamiento termo-viscoplástico de los metales.

Sobre la base de estas contribuciones, varios autores centraron su interés en el comportamiento a altas velocidades de deformación en aleaciones metálicas. De esas investigaciones, se dedujo que la inestabilidad plástica desempeña un papel destacado en la deformación y en el fallo de los materiales de ingeniería bajo solicitaciones dinámicas. Comprender la formación y propagación de la inestabilidad en los metales ofrece pasos significativos hacia la optimización del comportamiento del material a altas velocidades de deformación.

2. Estado del arte

2.1 Visión inicial general

En las últimas décadas, la deformación de los metales ha sido objeto de intenso estudio, ya que para ser capaz de analizar procesos a altas velocidades de deformación es necesario tener un conocimiento amplio del comportamiento del material ante sollicitaciones mecánicas y termodinámicas.

Para determinar que material es más conveniente utilizar en cada caso es necesario conocer la respuesta de las aleaciones metálicas bajo carga y para comprender el comportamiento termo-viscoplástico de los metales es necesario tener una descripción constitutiva del mismo.

Promovidos por la unión de los sectores industriales y económicos, como son la industria de automoción, la aeronáutica o la militar, la investigación realizada para obtener descripciones teóricas del comportamiento de deformación en aleaciones mecánicas ha conseguido llegar a ser más importante y tomar un papel principal de cara a estudios futuros.

Los sectores industriales buscan promover el estudio de los materiales sometidos a condiciones extremas como accidentes, impactos y explosiones. Sobre este tema se puede encontrar una vasta cantidad de publicaciones especialmente sobre el comportamiento de materiales sometidos a altas velocidades de deformación.

Los parámetros que están más relacionados con los procesos dinámicos son el endurecimiento por deformación, la sensibilidad a la temperatura y la sensibilidad a la velocidad de deformación del material.

Ciertos sectores de la ingeniería como son la industria automotriz, la aeronáutica y/o la militar están realmente interesados en entender mejor la formación de inestabilidades en procesos rápidos de carga. Con el fin de poder construir elementos mecánicos que sean capaces de absorber la energía en accidentes o cargas es de vital importancia conocer todas las causas que conducen a la formación de inestabilidades plásticas.

Tradicionalmente, para ser capaces de abordar el problema de la localización bajo alta tasa de carga se ha recurrido a los procedimientos experimentales. Sin embargo, las pruebas requieren de dispositivos complejos con coste muy elevado. Además, la información que puede obtenerse a partir del comportamiento del material es, muchas veces, limitado.

Una vez explicado el objetivo de este proyecto y las necesidades que promueven hacerlo se va a mostrar un pequeño resumen de algunos de los estudios que se han realizado sobre este tema, procesos a altas velocidades de deformación.

2.2 Dinámica de estricción y fragmentación

El experimento de la expansión del anillo se utiliza como vehículo para examinar el comportamiento del material a altas velocidades de deformación. Se han investigado las estricciones y la fragmentación en materiales dúctiles y el comportamiento de estos metales a velocidades de deformación en torno a 10.000 s^{-1} . La expansión del anillo se lleva a cabo experimentalmente mediante el uso de explosivos o mediante inducción electromagnética en el caso de ensayos dinámicos.

Mediante elementos finitos somos capaces de hacer simulaciones a grandes velocidades obteniendo imágenes de alta resolución espacial con las que se determina la secuencia de deformación y el fallo de la expansión del anillo al fraccionar por varias zonas a la vez. Las fotografías de alta velocidad revelan la multitud de estricciones (neckins) en la secuencia de fracturas e inmediatamente después de eso los fragmentos se descargan y se mueven como un cuerpo rígido. Se puede obtener como resultado inicial de estas imágenes que la tensión se encuentra localizada en el momento inicial de la fractura. La explicación y muestra de estas imágenes se hará al concluir la explicación de el ensayo de expansión del anillo.

Con objeto de entender mejor este modelo antes de exponer las investigaciones realizadas hasta el momento se va a explicar el desarrollo experimental de la expansión del anillo.

2.2.1 Desarrollo experimental

El principio de la carga electromagnética experimental para expandir el anillo es bastante simple. El objeto tiene una forma de un anillo circular delgado de radio R_0 y de dimensión transversal t y h , ambas tienen una medida significativamente inferior a la de R_0 . Este anillo se introduce en un solenoide de N espiras sin posibilidad de movimiento. En la Fig.6 se muestra un esquema explicativo del experimento del anillo en expansión.

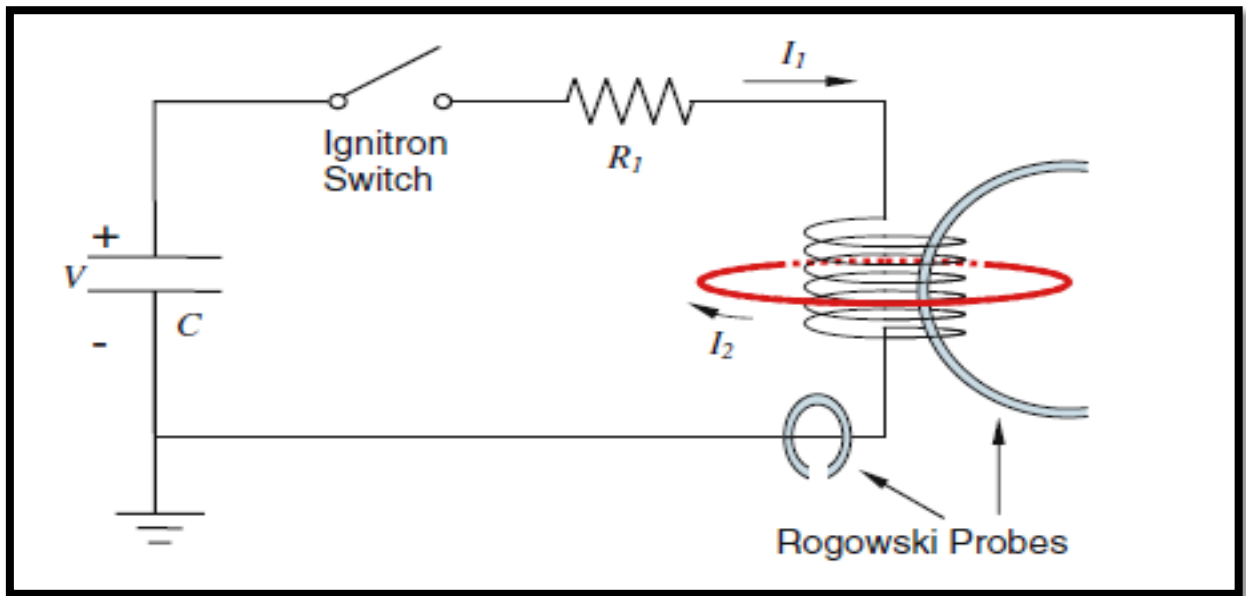


Fig. 6 Diagrama esquemático del experimento del anillo en expansión.

Cuando una corriente, I_1 , fluye a través de la bobina, una corriente inducida, I_2 , se desarrolla en la muestra. La interacción entre estos genera una fuerza repulsiva entre el solenoide y el anillo. Como resultado, el anillo se acelera radialmente para llegar a un rango de velocidades entre 80-200 m/s.

La corriente en la bobina es generada por una descarga de aproximadamente 20 KV y por un condensador de aproximadamente 25 μ F. La conmutación de la corriente se lleva a cabo por el disparo de un interruptor del circuito que también permite una fácil sincronización de la carga con los sistemas de grabación. La corriente en el solenoide y en el anillo se mide con dos bobinas tal y como sugiere Gourdin (1989).

Una de las bobinas se coloca alrededor de la línea que conecta la descarga con el solenoide mientras que la otra se coloca alrededor de todas las vueltas del solenoide y del anillo. De este modo, la primera bobina mide la corriente I_1 , mientras que la segunda mide la suma de la corriente en el anillo y en el solenoide: $I_1 + I_2$.

2.2.2 Fotografías de la expansión del anillo

Como se ha comentado al comienzo de este capítulo mediante tecnología innovadora somos capaces de hacer simulaciones a grandes velocidades obteniendo imágenes de alta resolución espacial con las que se determina la secuencia de deformación y el fallo de la expansión del anillo al fraccionar por varias zonas a la vez. En este apartado se explicará y se mostraran algunas fotografías del proceso de expansión del anillo.

Las imágenes de alta velocidad se obtuvieron a intervalos $11 \mu\text{s}$. La sucesión de imágenes de la expansión del anillo se muestra en la Fig. 7.

Todo el segmento de la cinta de la película corresponde al tiempo entre el inicio de la corriente y los próximos $110 \mu\text{s}$. Con estos intervalos continuos se puede mostrar los marcos discretos así como la cadena de imágenes.

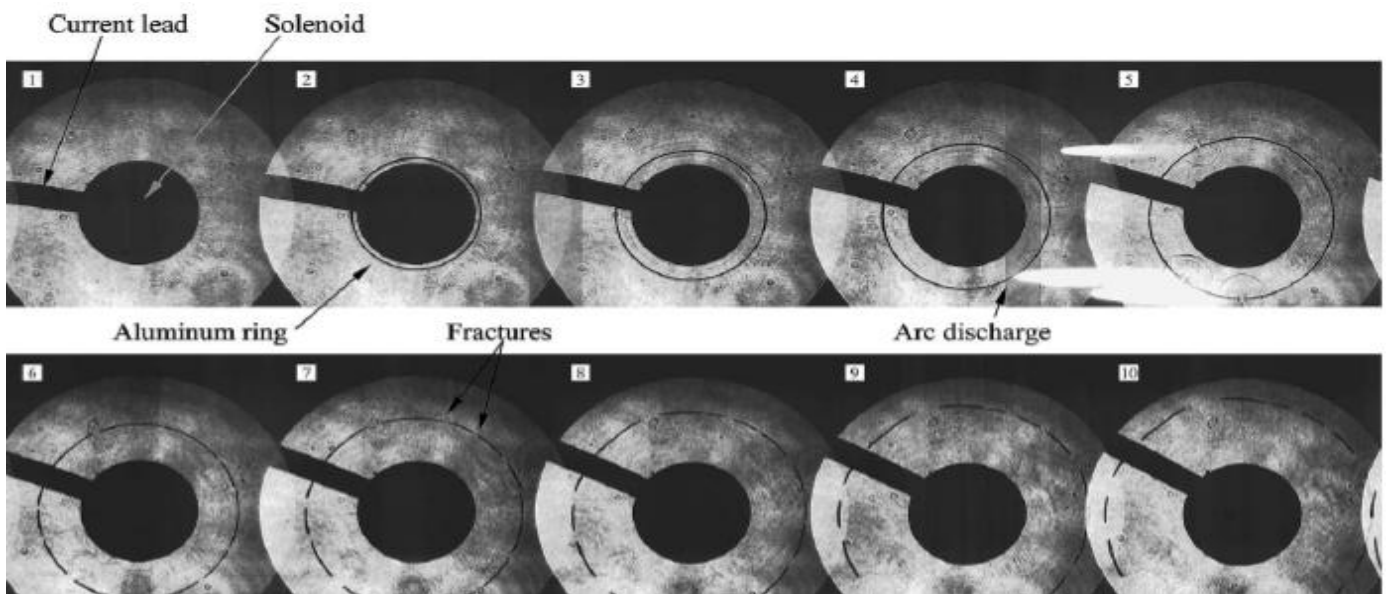


Fig. 7 Secuencia de imágenes que muestran la expansión de un anillo. Zhang y Ravi-Chandar (2008)

El círculo central oscuro es la sombra de la bobina utilizada para impulsar la expansión del anillo. El anillo se encuentra inicialmente en la periferia de este círculo oscuro. El anillo se expande según se va descargando el impulso de la corriente como se ve en la secuencia de imágenes. Cabe destacar que aunque el campo electromagnético tiene un ligero corte en la simetría debido a la lanzadera en los devanados, la expansión durante los primeros $40 \mu\text{s}$ es axilsimétrica. Más allá de $40 \mu\text{s}$, la aparición de las fracturas, el desarrollo de fragmentos y el movimiento rígido de los fragmentos aparecen en escena. Es evidente que las estadísticas de fragmentación pueden determinarse a partir de estas imágenes.

Los resultados más importantes de esta serie de experimentos se recogen en la colección de fotografías de alta velocidad. Estas fotografías de alta velocidad revelan los detalles de la aparición de las estricciones y la fragmentación que se producen al examinar con detalle este tipo de imágenes.

El tiempo de evolución de los cuellos y las fracturas puede ser visualizado con mayor claridad mediante la generación de una imagen compuesta a partir de la secuencia de alta velocidad. Para ser capaces de mostrar la progresión de la deformación del anillo en una sola imagen es necesario tomar una fotografía en cada momento en el que el anillo aumenta su deformación. Para poder juntar dichas imágenes hay que eliminar toda la imagen menos la ocupada por el anillo deformado y juntar todas en una. De este modo podemos observar una imagen compuesta por todos los pasos del anillo expandiéndose.

En la siguientes gráfica, Fig. 8 y Fig. 9 se muestran dos imágenes compuestas a partir de dos pruebas a diferentes velocidades sobre el Al 6061-S. Las velocidades de expansión utilizadas son aproximadamente 80 m/s y a 150 m/s respectivamente. Estos datos proporcionan una forma sencilla de identificar los eventos de deformación y fractura y pueden hacerse una serie de importantes observaciones de las imágenes compuestas.

Podemos ver en la primera imagen como hasta un cierto instante de tiempo t el anillo se deforma de manera axilsimétrica y sin ningún tipo de estricción. Teóricamente si el anillo siguiera este tipo de deformación se deformaría tanto que llegaría a desintegrarse, pero como vemos en las sucesivas imágenes no ocurre esto. Una vez empiezan a aparecer las estricciones o estrechamientos en el anillo aparecen zonas que empiezan a descargarse a hacia ambos lados. Al surgir estas estricciones indistintamente en el anillo, empiezan a aparecer fragmentos en varios puntos del anillo al mismo tiempo.

En la primera imagen aparecen 8 roturas, marcadas por los números rodeados con un cuadrado. Este número de fragmentos, estricciones y roturas dependerá unívocamente de la velocidad de expansión que tenga el anillo. Y la velocidad de expansión está directamente relacionada con la inercia, que será el parámetro fundamental para todos los casos estudiados. Se demostrará en los sucesivos puntos del trabajo que todos los resultados finales dependen de los efectos inerciales del anillo.

En las sucesivas imágenes los cuellos se identificarán en el lugar donde surgen por los números dentro de círculos con una numeración en sentido anti horario. La traza de cada cuello se mostrará por las líneas de puntos y por último las localizaciones de fractura se identificarán por los números dentro de cuadrados.

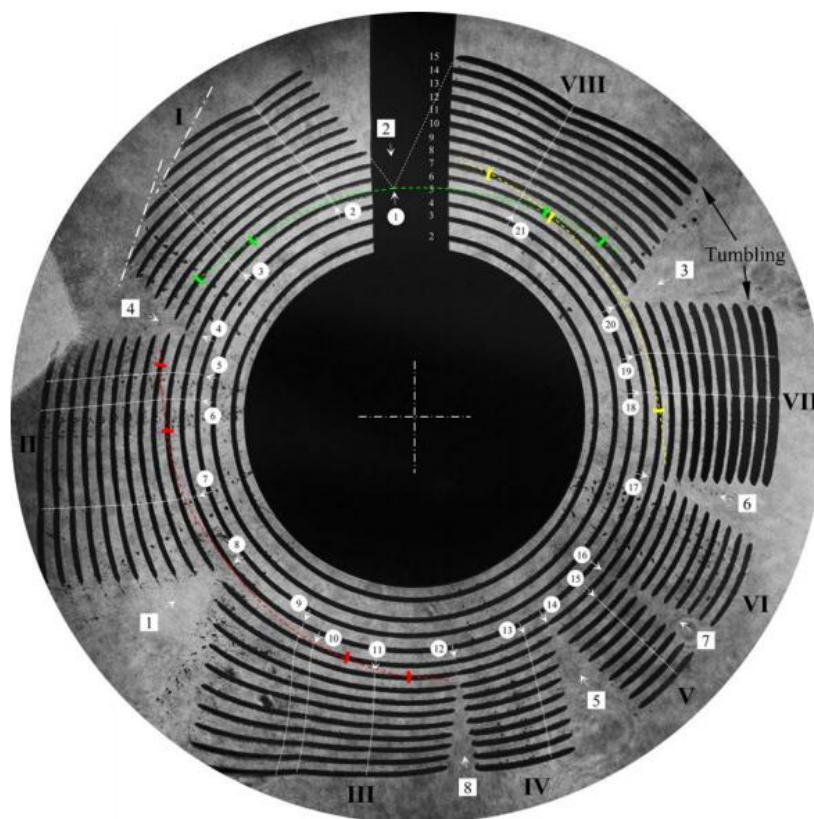


Fig. 8 Anillo de Al 6061-O a $V=80\text{m/s}$. Zhang y Ravi-Chandar (2008)

En esta segunda imagen, que se aumenta la velocidad de expansión hasta los 150 m/s, vemos como aumentan esas fracturas y estrechamientos de manera exponencial. No sólo aparecen muchas más roturas y estrechamientos sino que éstos aparecen antes en el tiempo. Esta imagen muestra claramente que las roturas aparecen indistintamente a lo largo del perímetro del anillo.

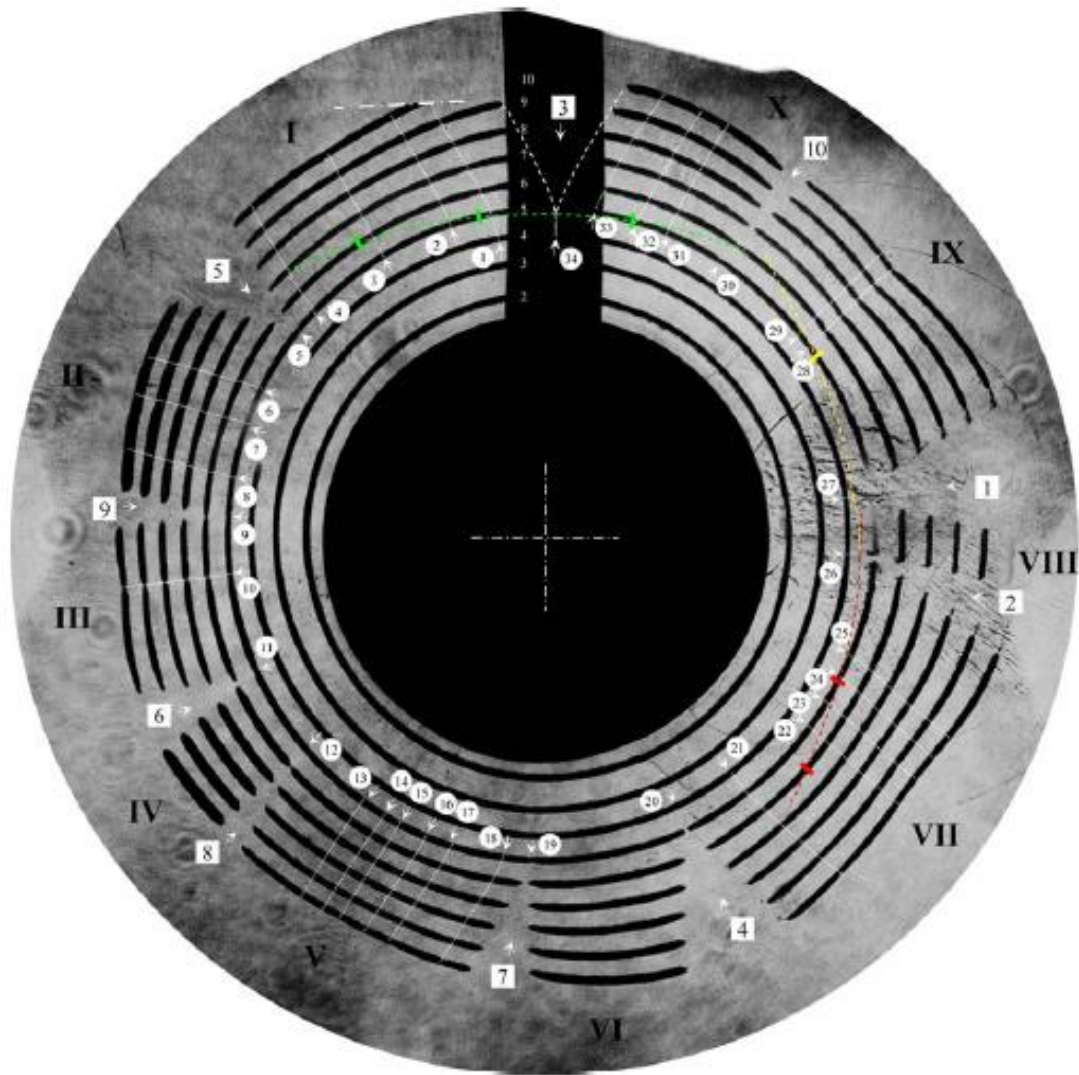


Fig. 9 Anillo de Al 6061-T6 a $V=150\text{m/s}$. Zhang y Ravi-Chandar (2008)

Esta última imagen, que sirve para poder explicar de manera concisa la deformación del anillo, representa el zoom en diferentes espacios de tiempo de una zona del anillo.

Nos muestra las posiciones de todos las estricciones. Los estrechamientos que se convirtieron en fractura se recalcarán por encima del resto.

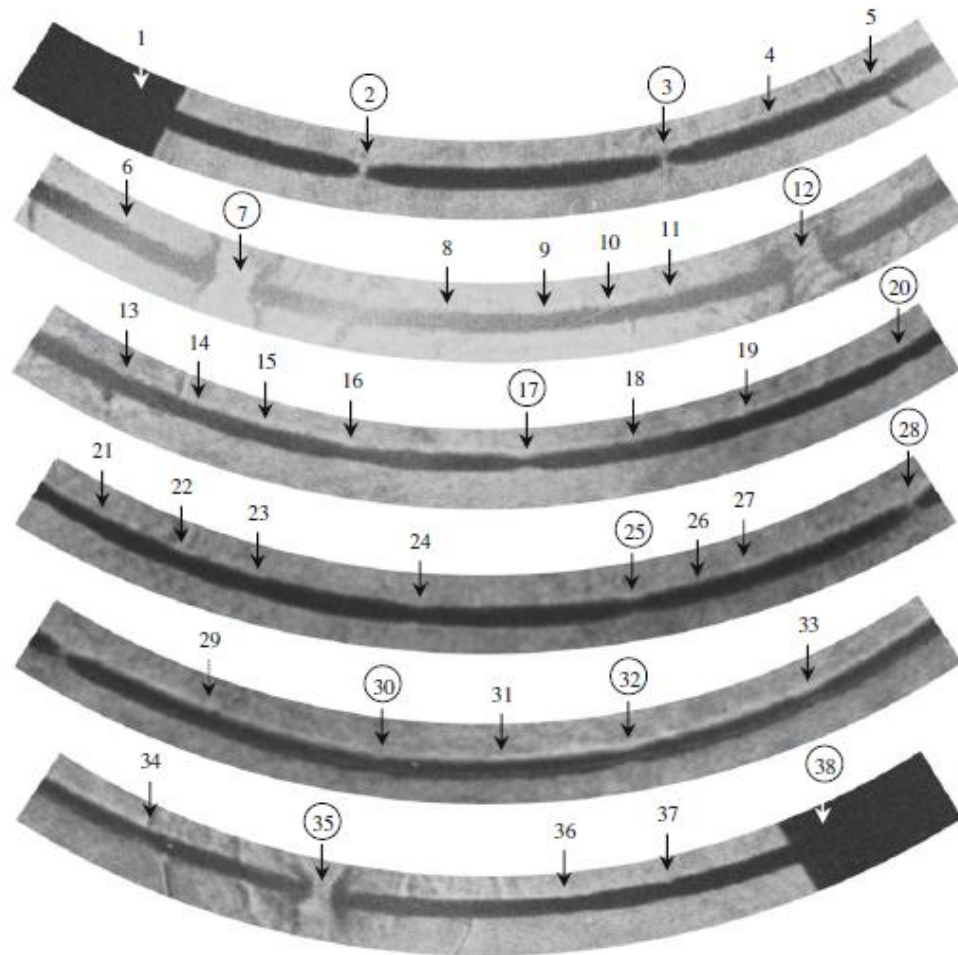


Fig. 10 Imagen Zoom de uno de los casos anteriores

Una vez explicado tanto el ensayo de expansión del anillo como las diferentes fotografías de los mismos, se procederá a exponer el resumen de las diferentes investigaciones realizadas sobre este tema a lo largo de la historia.

Entender la física de la fragmentación es importante en una amplia gama de aplicaciones industriales, médicas, militares y geofísicas. Los casos en los que los fragmentos del material son más grandes se dan en la desintegración de un material, en penetración de armaduras y en los cráteres. La deformación puede ser precedida por una deformación plástica de gran tamaño o puede aparecer por fragilidad dependiendo del material y de las velocidades de deformación. Nuestro interés principal se va a centrar en el primer caso. La fragmentación de los sólidos en dichas velocidades de deformación tan altas ha sido un tema de intensa investigación durante las últimas décadas. La investigación preliminar en esta área fue motivada por el trabajo de Mott en el estudio de proyectiles durante la Segunda Guerra Mundial. Estas observaciones están recogidas en un artículo que escribió. En el análisis final, Mott atribuye la distribución de tamaños de los fragmentos a la variabilidad estadística en la tensión o a causa de defectos intrínsecos del material. Y la distribución la asociaba a una propagación de la descarga o a una liberación de ondas en cada evento de fractura (que se supone independiente). El análisis original de Mott, se basa en dos simples teorías. Mott primero postuló que, a diferencia de lo que ocurre con materiales frágiles que está dominada por la presencia de defectos, la estricción y la fractura de materiales dúctiles se rigen por la dispersión en la tensión de fractura de un material en el límite de su ductilidad. Hay entonces una función de densidad de probabilidad, $p(\epsilon_f)$, asociada a la fractura por deformación.

En este modelo, cada punto del anillo continúa acumulando deformación plástica hasta que alcanza su tensión de fallo a menos que descargue. Esto nos lleva al segundo postulado. Una vez la fractura aparece en el eslabón más débil, esto genera una onda de descarga que viaja por el anillo descargando las regiones afectadas por las olas de liberación. Desde antes de la fractura todos los puntos en el anillo poseen solo velocidad radial, la onda de liberación tiene que proporcionar la velocidad tangencial a los puntos del material que están dentro de la región liberada. Este requisito ralentiza el progreso de la onda de liberación. Mott asume que el material se comporta de manera elástico perfectamente plástico y que la región liberada se mueve como un cuerpo rígido. La región que se descarga por la ola de liberación no puede aguantar más allá de la fractura por deformación, mientras que otras regiones continúan experimentando la expansión radial y por lo tanto son susceptibles a la fractura. Esta competencia entre la propagación de la onda de liberación y el esfuerzo continuado de la distribución de la tensión de fallo dicta la longitud de los fragmentos en la teoría de Mott.

Kipp y Grady (1985) y *Grady y Olsen (2003)* aplicaron la teoría estadística de Mott añadiendo el tiempo de fractura.

Desde estas primeras estimaciones y observaciones sobre la fragmentación, una serie de investigaciones experimentales, analíticas y numéricas se han realizado en los últimos años en una amplia gama de materiales. La literatura sobre el tema es bastante amplia y se proporciona un resumen conciso de los enfoques adoptados en estas investigaciones con el fin de colocar el presente trabajo en un contexto adecuado.

Posteriormente *Niordson (1965)* inició la investigación experimental de la fractura de tracción y respuesta a la fragmentación a altas velocidades de deformación. Fue quien diseñó un esquema de carga electromagnética con el fin de expandir el anillo, aunque él demostrara la capacidad de este sistema para permitir altas tensiones en la resistencia a la tracción sólo reportó en sus notas las observaciones preliminares. Más concretamente, mostró una imagen obtenida con la iluminación de las chispas que surgieron en los puntos de fractura debido a las corrientes inducidas que circulaban en el anillo. También sugirió que desde que aparecen nueve chispas a lo largo del anillo las fracturas deben ocurrir casi al mismo tiempo. Niordson también propuso que las medidas de deformación se podrían obtener con galgas, aunque la interferencia electromagnética y efectos dieléctricos parecían ser problemas importantes que no tenían fácil solución.

La capacidad del método de expansión del anillo fue explotado plenamente por Grady y Benson, (1983) que llevó a cabo numerosos experimentos sobre el cobre OFHC y el aluminio 1100-O. Sus medidas parecen ser los datos más amplios establecidos hasta la fecha y la mayoría de los investigadores utilizan estos datos para poder compararlos con sus resultados. Grady y Benson utilizó una cámara para capturar la evolución temporal del movimiento de un solo punto en el anillo y por tanto fueron capaces de correlacionar la evolución de la deformación medida en el anillo de expansión con la longitud de los fragmentos obtenidos después de dicha prueba.

La velocidad radial de expansión que fijaron al anillo estaba en un intervalo de entre 18-220 m/s para anillos de aluminio y de 6-138m/s para los anillos de cobre. Obtuvieron dos conjuntos de observaciones experimentales a partir de las pruebas del anillo y elaboraron una serie de conclusiones a partir de estos resultados.

En primer lugar, *Grady y Benson (1983)* señalaron que los fragmentos recuperados contenían estricciones que no habían sido completamente fracturados. Por lo tanto, contabilizaron el número de cuellos detenidos y fracturas efectuadas. También concluyeron que el número de fragmentos había aumentando casi linealmente con la velocidad de deformación.

En segundo lugar, trazaron la distribución de la masa de los fragmentos y los compararon con el análisis de Mott. Esto sugirió que, si bien la idea de onda de la liberación estaba en acuerdo razonable con las observaciones experimentales, había un número significativo de fragmentos fuera de la estimación de Mott.

Finalmente Grady y Benson (1983) utilizaron la longitud total de todos los fragmentos recogidos para obtener la medida de la deformación después de la fractura. De este modo, la fractura dinámica del material fue aumentando como una función de la velocidad de expansión del anillo desde 0.222 a 0.45 para el aluminio y 0.47 a 0.65 para el cobre, en cambio, la tensión cuasi-estática al fallo fue 0.075 y 0.40 para el aluminio y cobre respectivamente.

Gourdin (1989) llevó a cabo un modelo electromagnético completo para la interacción entre la corriente en la bobina de conducción y la corriente inducida en el anillo de expansión. Las mediciones de la expansión radial permitieron que el comportamiento tensión-deformación que se determina a altas velocidades de deformación se generara en la expansión del anillo.

Altynova continuó con la idea experimental que tenía Gourdin. Además investigó la deformación en la rotura y las estadísticas de fragmentación que “confirman” un aumento de la ductilidad del cobre OFHC y del Al-6061 con la velocidad de carga.

Hay una extensa literatura sobre simulaciones numéricas, la mayoría de ellas tratando de explicar la aparición de las estricciones y la fragmentación. Antes de explicar los estudios realizados mediante simulaciones numéricas se explicaran los realizados mediante perturbaciones.

En primer lugar, las ecuaciones de momentos que rigen la extensión uniforme del anillo tienen que completarse con la descripción constitutiva apropiada incorporando el endurecimiento por deformación, la velocidad de deformación, el ablandamiento térmico... etc. Claramente, la expansión radial uniforme de la muestra del anillo (o una deformación equivalente proyectada sobre una varilla recta) puede ser escrita como la solución homogénea para este problema.

Y en segundo lugar, una pequeña perturbación periódica se superpone sobre la solución homogénea. Para poder obtener las ecuaciones que gobiernan la evolución de las perturbaciones, éstas se linealizaron sobre el estado homogéneo. Como explica Vadillo et al. (2012) la perturbación que crece más rápido es seleccionada para ser la dominante.

De todos los análisis de perturbación, una característica común manifiesta que las longitudes de ondas largas y cortas son filtradas por la inercia o por la viscosidad y algunas longitudes de onda intermedias son las que controlan al resto. Esta longitud de la onda es tomada para dictar el tamaño de los cuellos y de los fragmentos. Curiosamente, casi todos los análisis de perturbación parecen estar gobernados por la velocidad de expansión, medida por *Grady y Benson (1983)*. En otras palabras, uno es incapaz de discriminar el efecto de endurecimiento por deformación y la velocidad de endurecimiento por deformación en la fragmentación en ausencia de una comparación más detallada con los resultados experimentales.

También se han llevado a cabo diferentes simulaciones numéricas para examinar el experimento del anillo de expansión. *Han y Tvergaard (1995)* realizaron un análisis de elementos finitos de la expansión del anillo con una función que describe el modelo del material para la tensión de la plasticidad en el endurecimiento. La generación del cuello múltiple fue probada con éxito en estas simulaciones.

Pandolfi (1996) realizó un ensayo similar por simulación numérica, pero incluyendo el endurecimiento por deformación, la de dependencia de la tensión, el ablandamiento térmico modelado por completo y, además, la fractura. Estos parámetros se simulaban con un modelo de superficie de cohesión. Mostraron una comparación de la cantidad prevista de cuellos y los fragmentos de éstos con las observaciones de *Grady y Benson (1983)* y los resultados parecen estar en buena correlación. Recientemente, *Guduru y Freund (2002)* realizaron una simulación numérica completa de un material con endurecimiento por deformación, con un modelo de Gurson modificado para capturar la formación de huecos y la fractura final.

Becker (2002) también simuló la fragmentación en un U-6%Nb de aleación con un modelo del tipo Gurson y el resultado obtenido predecía con cierta exactitud el número de fragmentos. Estas simulaciones sobreestimaban el número real de cuellos, pero predecían el número de fragmentos razonablemente bien.

En resumen, los dos enfoques diferentes del análisis de la estricción y final problema de la fragmentación acaban con similares predicciones. Mientras que la dispersión en los resultados observados por *Grady y Benson (1983)* quedan dentro del postulado de Mott, el valor medio del número de fragmentos observados se compara con la predicción de los análisis de perturbación. ¿Qué teoría es la más adecuada para la determinación del comportamiento de la fragmentación del material? Nuestro principal objetivo en este proyecto es proporcionar importantes observaciones adicionales, que identifiquen claramente la secuencia temporal, la aparición y el crecimiento de los cuellos y de los fragmentos. También mostraremos unas observaciones experimentales de la evolución temporal de una expansión homogénea, la generación de cuello y fractura del anillo a diferentes velocidades de expansión.

Para poder tener una visión más amplia y general de todas las investigaciones se adjunta la siguiente tabla en la que se muestra los diferentes autores y sus trabajos Tabla 1: Historia de la expansión de anillos

Tabla 1: Historia de la expansión de anillos

Tipo de análisis	Autor	Año	Trabajos
Experimental	<i>Mott</i>	1945	Primeros trabajos sobre la fragmentación. Uso de fragmentos de bombas caseras durante la 2ª GM. Los tamaños de los fragmentos por causa de una variabilidad estadística en la tensión.
	<i>Niordson</i>	1965	Diseño de un esquema de carga electromagnética
	<i>Grady y Benson</i>	1983	Experimentos con inducción electromagnética, grandes resultados
	<i>Gourdin</i>	1989	Incorporación de un VISAR en los modelos
Perturbación	<i>Grady y Benson</i>	1983	Realizaron análisis de perturbaciones además de análisis experimentales
	<i>Vadillo et al.</i>	2012	Demostración de la influencia de la inercia
Mediante elementos finitos	<i>Han y Tvegaard</i>	1995	Análisis de elementos finitos de la expansión del anillo
	<i>Pandolfi</i>	1996	Incluyó el endurecimiento por deformación al modelo de Han y Tvegaard
	<i>Altynova</i>	1996	Comparación de resultados experimentales en tres aleaciones
	<i>Becker</i>	2002	Predicción del número de fragmentos razonablemente bien con un modelo del tipo Gurson
	<i>Guduru y Freund</i>	2002	Modelo del tipo Gurson modificado para capturar la formación de huecos y la fractura final.
	<i>Grady y Olsen</i>	2003	Aplicaron la teoría de Mott añadiendo la contabilidad adecuada para el proceso de fractura

3. Configuración numérica

Para ser capaces de recopilar los resultados necesarios con el objeto de analizarlos posteriormente necesitamos simular la expansión radial de un anillo a altas velocidades de expansión. Para ello se utilizará un programa de elementos finitos con el que realizaremos una serie de simulaciones. A la hora de definir nuestro anillo admitimos como buena la hipótesis de ser perfectamente axil simétrico y que no tener ningún defecto. Con esta suposición la expansión del anillo debería producirse con la misma forma y magnitud por todos sus lados pero veremos qué es lo que ocurre.

Se ha decidido utilizar el programa Abaqus/Explicit 6.11 (2011) con el fin de realizar la simulación numérica de cada una de las situaciones a las que se ha sometido al anillo. Se ha diseñado una geometría y dimensiones adecuadas para este tipo de experimentos. El radio interior utilizado para nuestro anillo es de $R_i = 15\text{mm}$ y la sección inicial del objeto será cuadrada de $1\text{mm} \times 1\text{mm}$.

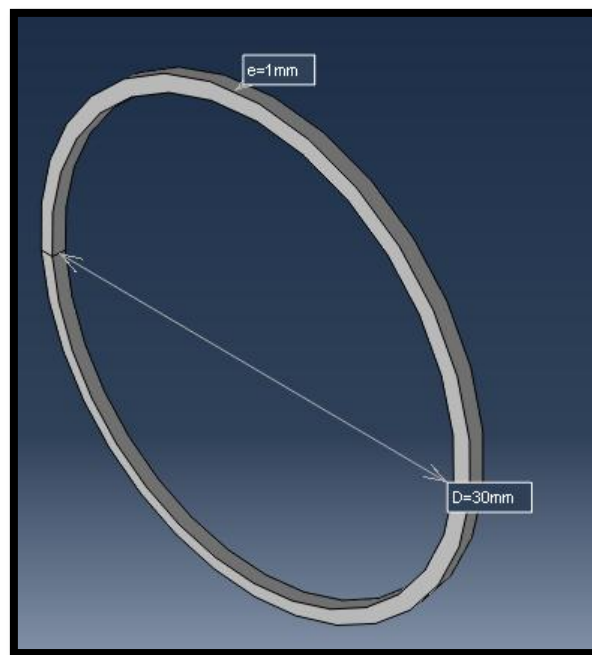


Fig. 11 Forma y dimensiones del anillo

Tomaremos como buena la hipótesis de comportarse como un material elástico perfectamente plástico para simplificar al máximo posible tanto la configuración numérica como los resultados futuros.

Otro parámetro que se debe definir es el nivel de flujo de tensión utilizado, σ_y , que inicialmente será de 500 MPa.

Configuración numérica

Para poder simular que nuestro objeto tratado es un metal la densidad con la que partiremos nuestros ensayos será de 7850 Kg/m^3 , utilizaremos un Módulo de Young de 210 Gpa y un coeficiente de Poisson de 0.3.

El siguiente paso antes de definir el tipo de cargas que queremos implantar en nuestro anillo será concretar el tipo de sólido que es. Nuestro anillo será un sólido homogéneo y con un tipo de análisis *dynamic, explicit*.

El tiempo que durará cada simulación será de 0.01 s, tiempo más que suficiente para deformar el anillo hasta que se produzcan las roturas.

La condición de carga es una velocidad radial aplicada en el área interior del anillo con dirección radial y sentido hacia el exterior del anillo. La velocidad de expansión de referencia con la que se iniciarán las simulaciones será de 200 m/s aunque este valor se modificará en los sucesivos análisis.

Para ser capaces de introducir una condición de contorno radial se debió cambiar el tipo de coordenadas, pasando de coordenadas cartesianas a coordenadas cilíndricas. Para conseguir que la condición de contorno aplicada fuera más precisa se decidió realizar una partición del material en dos partes iguales como se puede apreciar en la Fig.12.

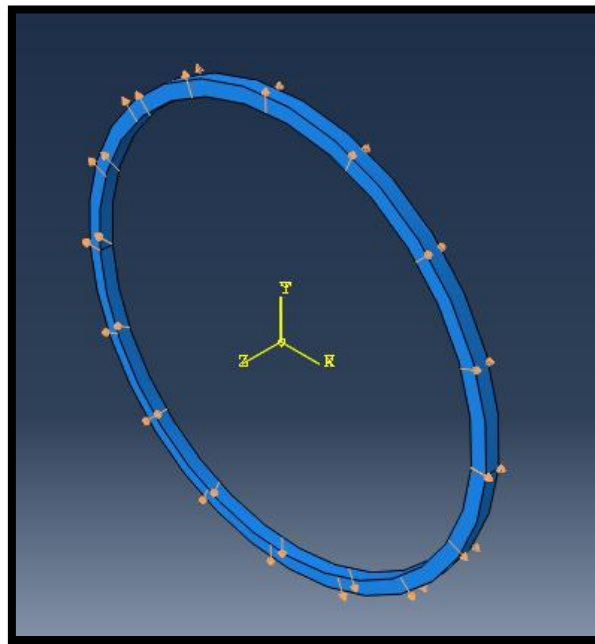


Fig. 12 Condición de carga, coordenadas cilíndricas y partición.

Configuración numérica

El mallado utilizado muestra una simetría radial en el que no se introdujeron ni imperfecciones ni defectos. Este mallado se realizó calculando el número de elementos finitos que había que colocar en el espesor del anillo para que todos los elementos de la maya tuvieran un volumen prácticamente igual.

Finalmente el número utilizado fue de 4 en cada espesor y para calcular el número de elementos utilizados en el perímetro del anillo se recurrió a una simple ecuación matemática imponiendo la misma premisa que en el caso anterior, que todos los elementos del anillo fueran ser prácticamente iguales.

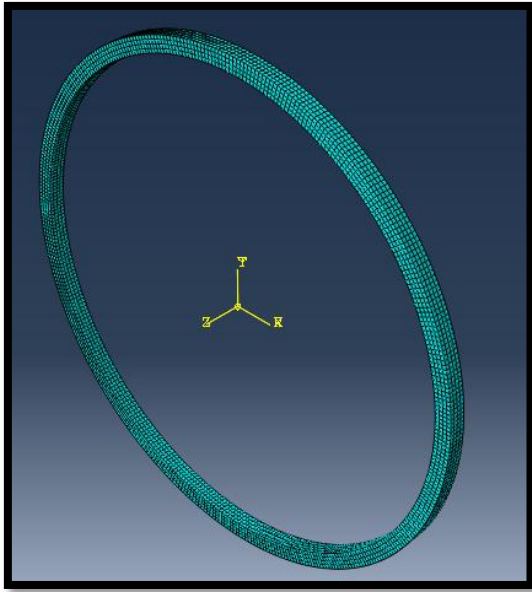


Fig. 13 Anillo mallado

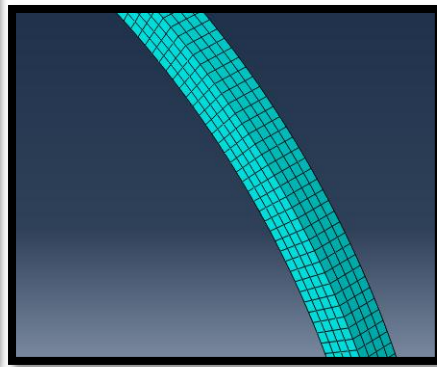


Fig. 14 Zoom de la sección

Con esta configuración detallada se podrá proseguir con el estudio de análisis y resultados, alterando aquellos parámetros que influyan en los resultados y concluyendo qué parámetro es el determinante.

Con el principal objeto de entender mejor los siguientes apartados se va a facilitar una tabla en la que se detallarán todos los parámetros influyentes usados en la configuración de referencia.

En la tabla se van a detallar los parámetros con sus respectivas unidades.

Tabla 2 Propiedades de la configuración de referencia.

Tipo	Parámetro	Unidad	Valor
<i>Condición de contorno</i>	<i>Velocidad</i>	<i>m/s</i>	<i>200</i>
<i>Geometría</i>	<i>Radio interior</i>	<i>mm</i>	<i>15</i>
	<i>Radio exterior</i>	<i>mm</i>	<i>16</i>
	<i>Espesor</i>	<i>mm</i>	<i>1</i>
	<i>Sección</i>	<i>mm²</i>	<i>Cuadrada de 1x1</i>
<i>Material</i>	<i>Densidad</i>	<i>Kg/m³</i>	<i>7850</i>
	<i>Nivel de flujo de tensión</i>	<i>MPa</i>	<i>500</i>
	<i>Modulo de Young</i>	<i>GPa</i>	<i>210</i>
	<i>Coef. Poisson</i>	<i>-</i>	<i>0.3</i>

A partir de esta configuración de referencia se irán modificando los valores de las propiedades en los diferentes apartados.

4. Análisis y resultados

En este punto se va a tratar de mostrar los análisis y resultados de la deformación del anillo manteniendo todos los parámetros de la configuración inicial excepto la velocidad de expansión por su gran influencia en los resultados finales.

Primero, para entender bien la diferencia entre estrechamientos y roturas se van a adjuntar una serie de imágenes de una de las simulaciones realizadas con el anillo. De este modo se podrá contemplar cómo se van produciendo estrechamientos en el perímetro del anillo y cuáles de ellos acaban en rotura tras producirse la descarga.

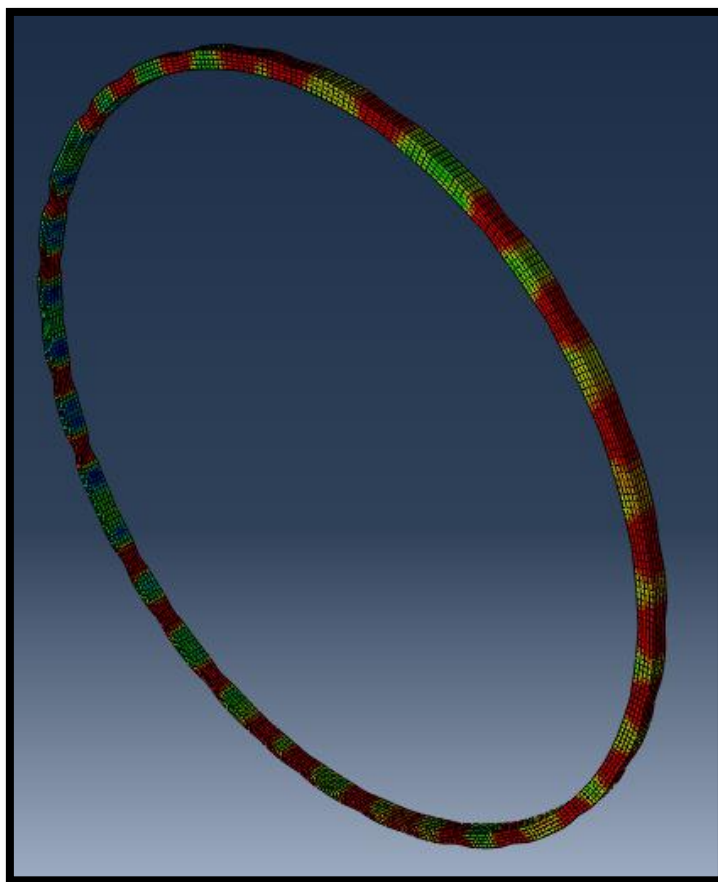


Fig. 15 Anillo expandiéndose

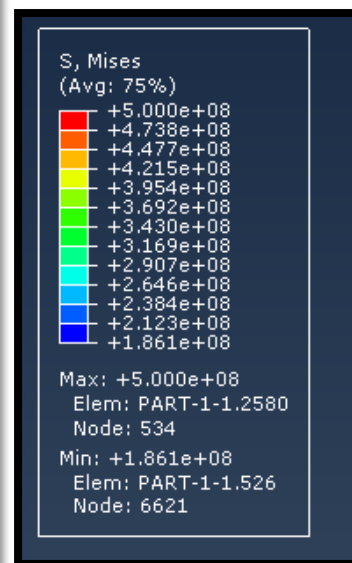


Fig. 16 Leyenda

La imagen mostrada en la parte superior, la Fig.15 representa uno de los primeros pasos de la expansión del anillo. Se ve con facilidad las zonas en las que comienzan a formarse estricciones, las marcadas de color rojo, que tienen una mayor tensión como marca la leyenda. Representadas en color amarillo verdoso están los segmentos del anillo con menor deformación.

Al continuar con la expansión se descargarán las zonas menos deformadas y esto provocará que algunos estrechamientos se conviertan en rotura.

Análisis y resultados

Se puede ver que los estrechamientos se producen indistintamente a lo largo del perímetro del anillo. Hay que aclarar que no sólo aparece una rotura, sino que aparecen varias roturas al mismo tiempo y éstas aumentan su magnitud al continuar la expansión.

En la siguiente imagen Fig. 17, se muestra la misma simulación del anillo pero en un tiempo superior al anterior. Con esta imagen se puede entender de manera muy simple lo comentado anteriormente. Las zonas menos deformadas se descargan hacia ambos lados disminuyendo de este modo su tensión. Como vemos han pasado de tener una tensión de 3.8×10^8 a una cercana a 1×10^8 Pa.

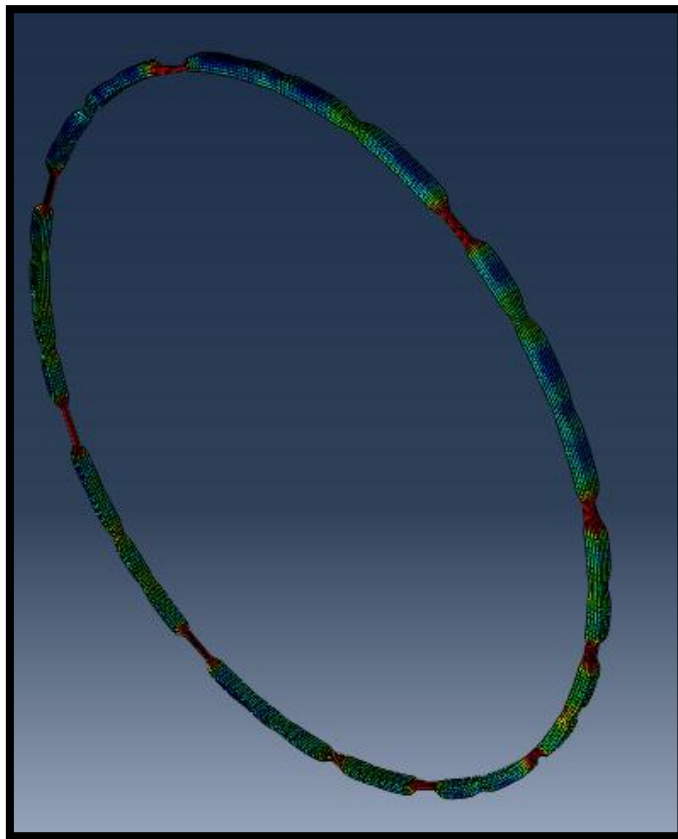


Fig. 17 Anillo deformado hasta alcanzar rotura

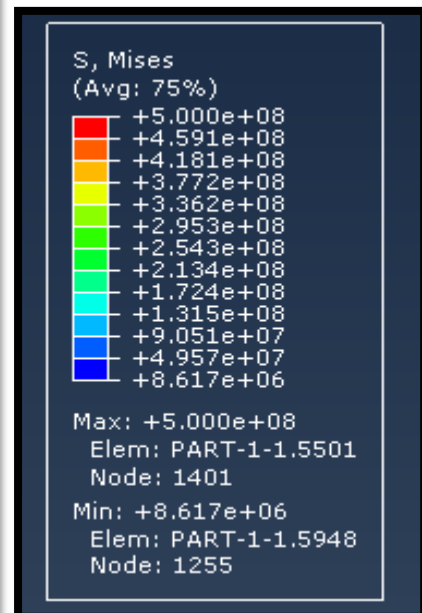


Fig. 18 Leyenda

Al descargarse hacia ambos lados es cuando se producen las roturas. Esos estrechamientos que sufren las descargas aumentan su tensión hasta los 5×10^8 Pa y se producen las fracturas en esos estrechamientos.

Como ya se ha explicado anteriormente, la velocidad es uno de los parámetros más importantes en este tipo de experimentos. ¿A qué afecta la velocidad?

Se puede ver en la Fig. 19 Gráfica que muestra la relación de la velocidad con las roturas y las estricciones que al ir aumentando la velocidad aumenta de manera logarítmica tanto el número de roturas como el número de estricciones. Este aumento es debido a la inercia del material. Al aumentar su velocidad estamos aumentando los efectos inerciales que experimenta el anillo en el ensayo y éstos son los que gobiernan el número de estricciones y causan las roturas.

En esta gráfica representada se puede ver el nº de roturas o estricciones representado en el eje vertical y la velocidad en m/s representado en el eje horizontal.

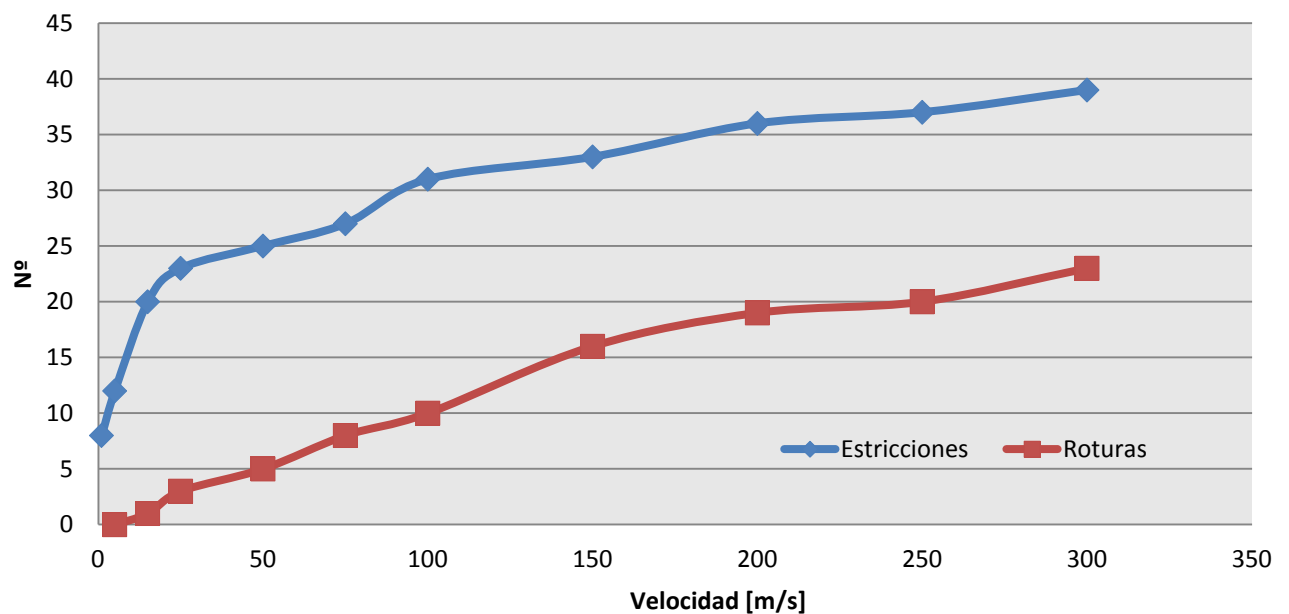


Fig. 19 Gráfica que muestra la relación de la velocidad con las roturas y las estricciones

El número de estricciones aumenta en una proporción mayor a la que lo hace el número de roturas. El número de fracturas nunca podrá ser superior al número de neckins porque para que se produzca una rotura, como se ha explicado antes, es necesario que exista al menos un estrechamiento en el anillo y que sufra una descarga.

Se puede observar que con velocidades pequeñas la diferencia entre roturas y estricciones es mucho mayor que al ir aumentando su velocidad. A velocidades altas ésta diferencia se estabiliza y es prácticamente constante.

De ahora en adelante, para poder diferenciar la generación de roturas y estricciones en las siguientes gráficas tendrán como ejes: el perímetro normalizado será el horizontal y la deformación plástica en el eje vertical. Cada pequeño pico de deformación plástica en el perímetro se puede entender como una estricción, en cambio, cuando este tipo alcanza valores muy altos de deformación se considera que ya es una rotura.

El tiempo en que cogemos los detalles de la deformación del anillo influye en los resultados finales. Es muy diferente tomar los resultados en el primer paso de ensayo a coger los datos cuando ha terminado la simulación.

Gracias a esta diferencia razonaremos el por qué para poder comparar los procesos de este proyecto hemos tenido que coger el mismo instante de tiempo.

Para ver de manera detallada la diferencia se han elaborado dos gráficas en las que se muestra la evolución de la deformación plástica en todos los puntos del perímetro del anillo a lo largo del tiempo de una simulación. Éste análisis completo de la expansión del anillo se ha realizado a dos velocidades diferentes, a 50 m/s y a 250 m/s.

En la siguiente página se muestra un gráfico, Fig. 20 Gráfica que muestra la influencia del tiempo a $V=50$ m/s, en el que se mostrarán todos los pasos (steps) ordenados de menor a mayor según su tiempo de detalle.

En el eje X se detalla desde 0 hasta 1 el perímetro normalizado y en el eje Y de 0 a 3 se mostrará la deformación plástica.

Se puede apreciar con mucha facilidad que en los primeros steps no se produce ninguna estricción ni rotura. En cambio, según vamos aumentando esos tiempos vemos que empiezan a aparecer dichas estricciones y desmarcándose de las demás las que se convierten en rotura. Detallar que en el último paso, el step20, las roturas producidas son mucho más grandes que en tiempos anteriores eso quiere decir que una vez se producen las roturas, aumentan con el tiempo en vez de mantener su dimensión.

Podemos ver en la Fig. 21 Gráfico que muestra la influencia del tiempo a $V=250$ m/s, como ocurre exactamente lo mismo que en el caso anterior pero con un mayor número de roturas y éstas teniendo una mayor deformación plástica. Al tener una mayor velocidad aumentamos la inercia y ésta hace que se produzca un mayor número de roturas y un mayor número de neckins.

Si al comparar estos dos supuestos hubiéramos tomado un tiempo muy adelantado para $V=50$ m/s y un tiempo muy corto para $V=250$ m/s hubiéramos llegado a resultados incoherentes y erróneos. Hubiéramos pensado que en el caso en que la velocidad es igual a 50 m/s hubiera habido un mayor número de roturas que para el caso en que la velocidad es de 250 m/s. Y como se ha detallado anteriormente, esa conclusión es completamente errónea. Por este motivo, de ahora en adelante todos los datos adquiridos a la hora de realizar las simulaciones se tomarán con el mismo instante de tiempo.

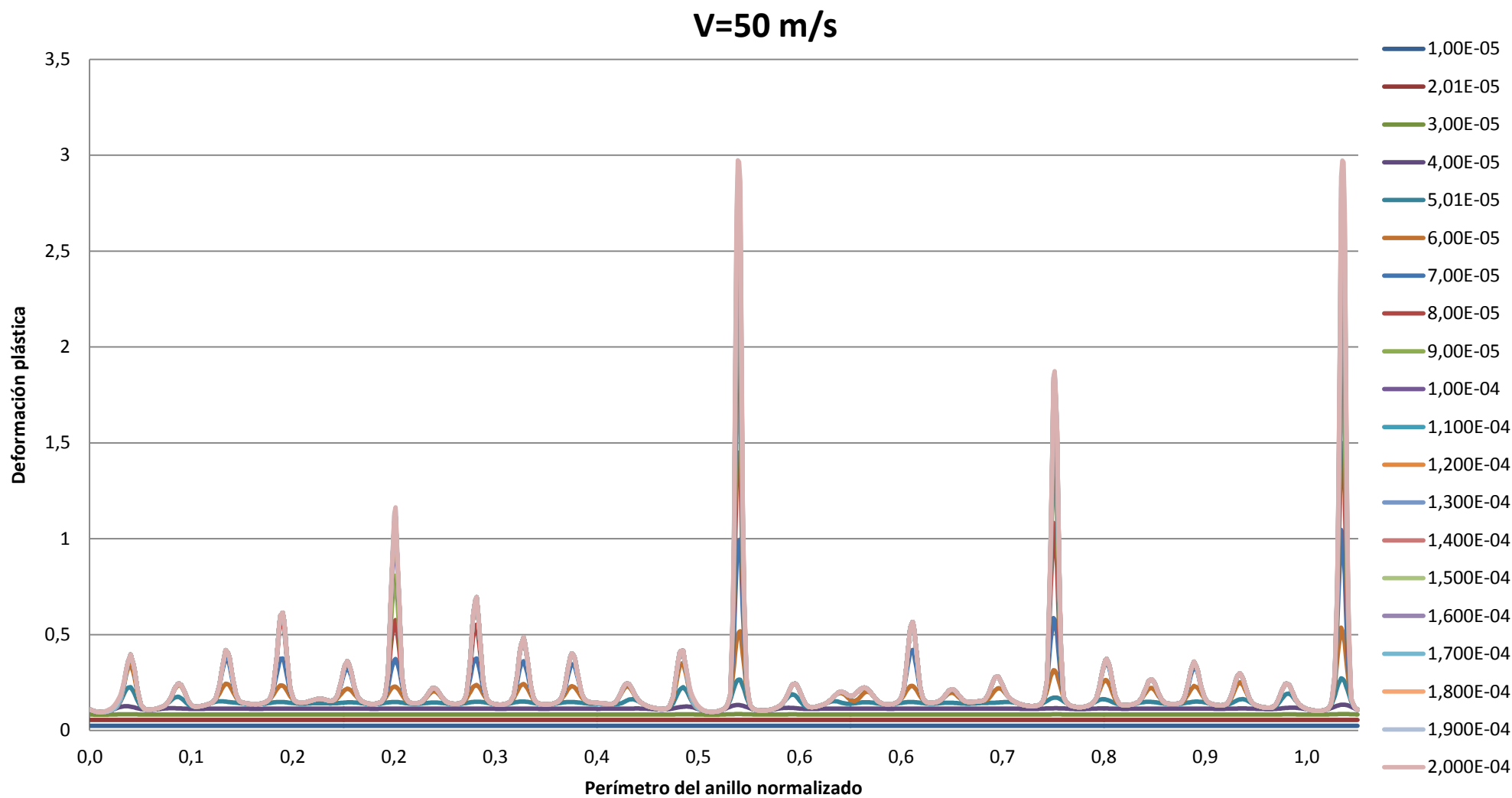


Fig. 20 Gráfica que muestra la influencia del tiempo a V=50 m/s. Leyenda mostrada en segundos.

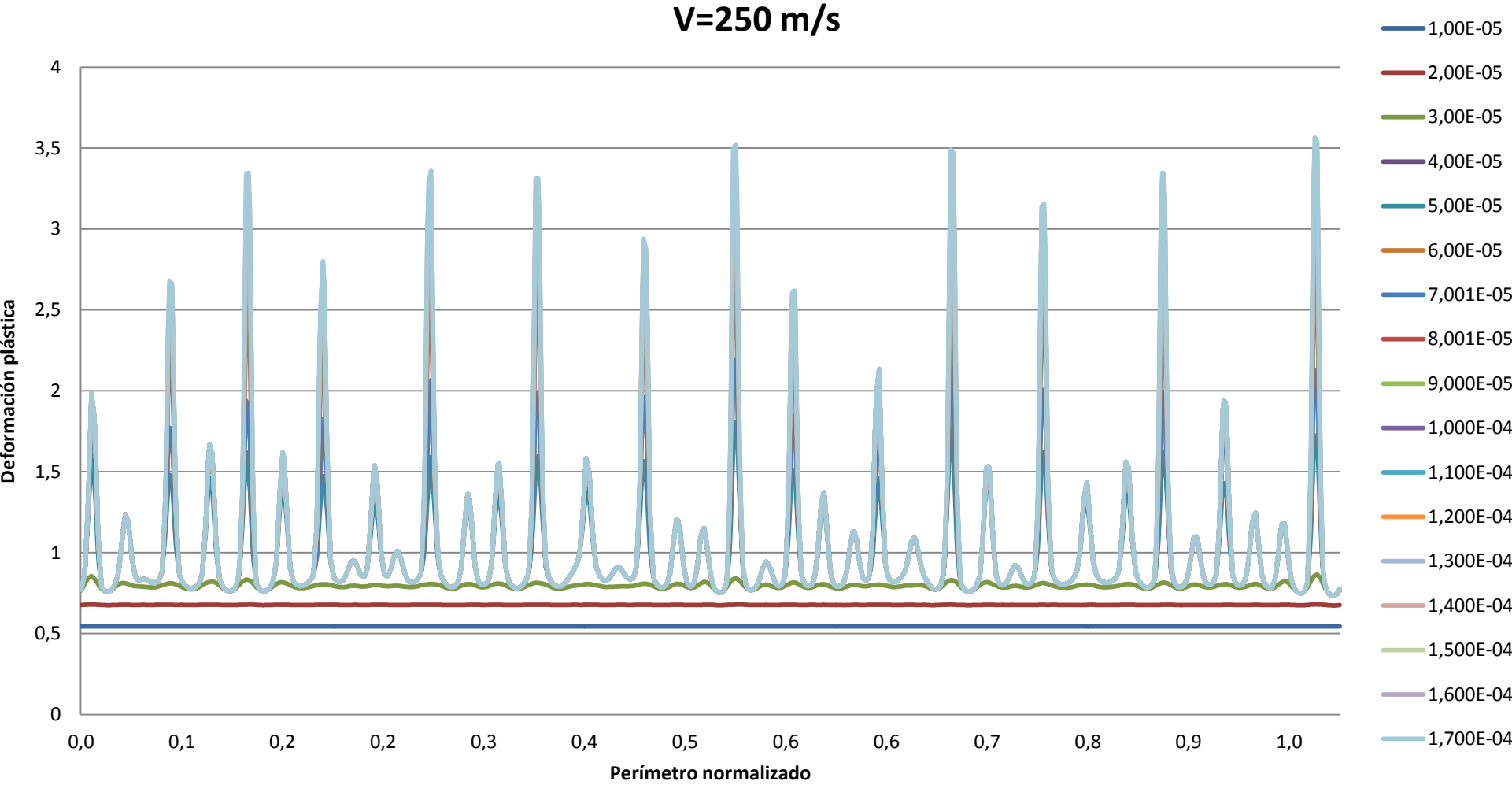


Fig. 21 Gráfico que muestra la influencia del tiempo a V=250 m/ . Leyenda mostrada en segundos.

Como acabamos de ver la velocidad de expansión sí que influye en la formación y aparición de estricciones y roturas. Para poder analizarlo con una mayor sencillez se expondrá una serie de gráficas mostrando cómo varía la deformación plástica al ir aumentando la velocidad.

Para evitar resultados erróneos se mantendrá la configuración de referencia excepto la velocidad que será el parámetro que variaremos. Para obtener unos resultados fiables tomaremos los datos en el mismo instante de tiempo, $1.00E-04$ s desde que se inicia la expansión.

Los ejes en todas las gráficas de esta sección serán exactamente los mismos que en el caso anterior, se tendrá en el eje X desde 0 hasta 1 el perímetro normalizado y en el eje Y de 0 a 3 la deformación plástica.

En la primera secuencia de imágenes se ha decidido aumentar la velocidad desde 5m/s hasta 25m/s.

Podemos ver en el gráfico inicial, Fig.22 que al ser una velocidad tan pequeña para ese tiempo no se produce ninguna deformación plástica y por eso el gráfico representa una línea recta con deformación plástica nula.

En el segundo caso, Fig. 23, se aumenta la velocidad hasta llegar a los 15m/s y vemos como empiezan a aparecer multitud de estricciones pero para este tiempo siguen siendo muy pequeñas y débiles y no provocan ninguna rotura. Y en el tercer caso de esta secuencia, Fig.24, al aumentar la velocidad hasta los 25m/s se ve que las estricciones toman una deformación plástica mayor que en los dos casos anteriores pero de igual manera no llegan a convertirse en rotura porque el tiempo estipulado es muy corto para estas velocidades tan reducidas.

En la segunda secuencia vemos que al aumentar la velocidad hasta los 50m/s ya conseguimos que se produzcan para este tiempo suficientes estrechamientos como para generar roturas. Al tener ya un número de gráficas aceptable se puede ir comparando como varían y como afecta la velocidad. No sólo se aprecia que se producen roturas en el anillo sino que esas roturas cada vez tienen una deformación plástica mayor.

Y por último, en la secuencia de gráficas final, que llegamos hasta una velocidad de 300m/s se puede ver que el número de estricciones producidas con respecto a velocidades inferiores es muchísimo mayor y que la mayoría de estas estricciones se convierten en rotura a velocidad de 300m/s. Fig. 31.

Otro punto a destacar es que al ir aumentando la velocidad se va viendo que ningún punto del perímetro normalizado del anillo tiene deformación plástica nula, sino que todos los puntos están por encima de valores superiores a cero. Esto es debido a los efectos inerciales producidos en el anillo que hacen que se comporte de manera más estable.

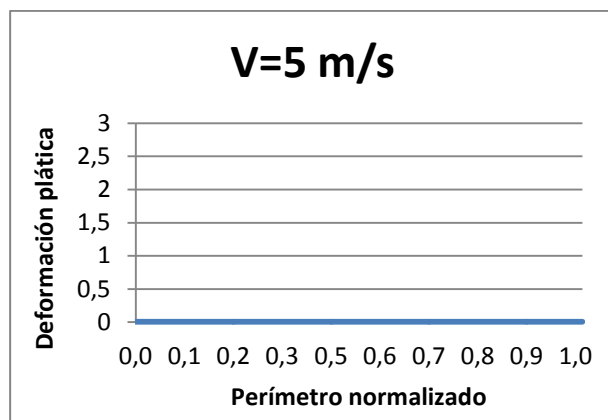


Fig. 22 Gráfica con configuración inicial a $V=5\text{m/s}$

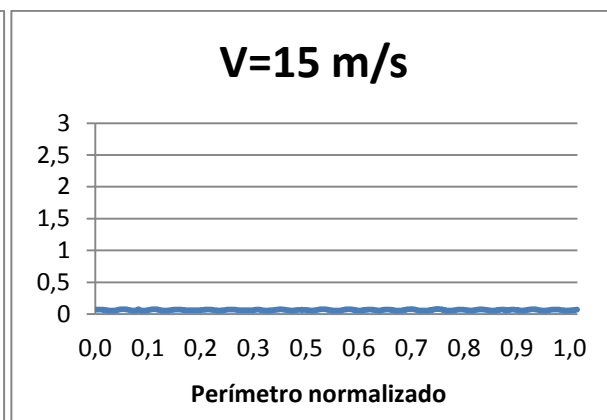


Fig. 23 Gráfica con configuración inicial a $V=15\text{m/s}$

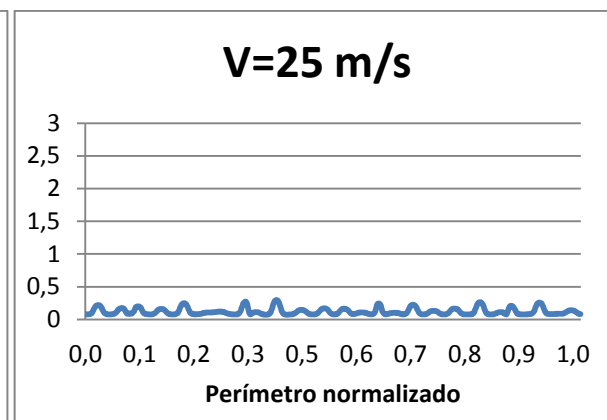


Fig. 24 Gráfica con configuración inicial a $V=25\text{m/s}$

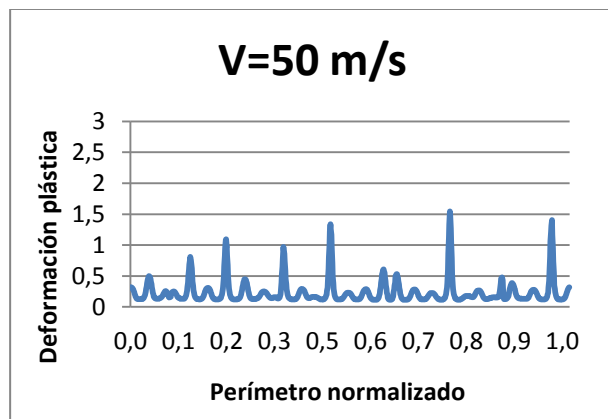


Fig. 25 Gráfica con configuración inicial a $V=50\text{m/s}$

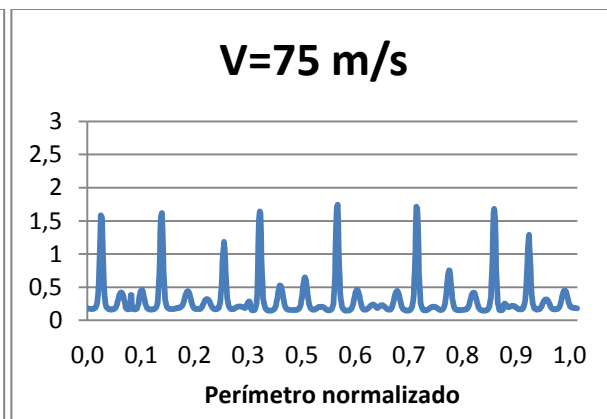


Fig. 26 Gráfica con configuración inicial a $V=75\text{m/s}$

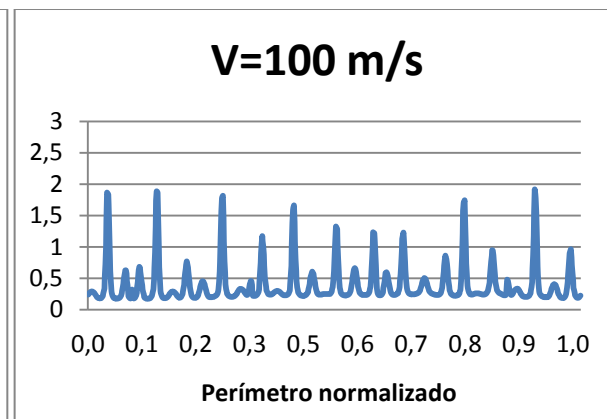


Fig. 27 Gráfica con configuración inicial a $V=100\text{m/s}$

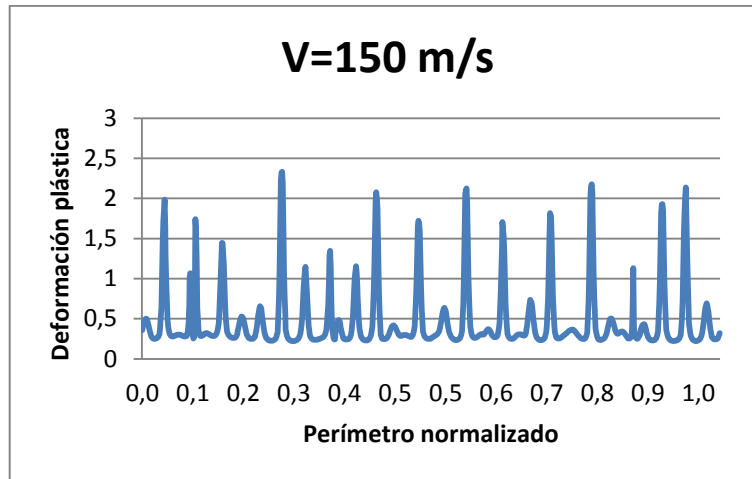


Fig. 28 Gráfica con configuración inicial a V=150m/s

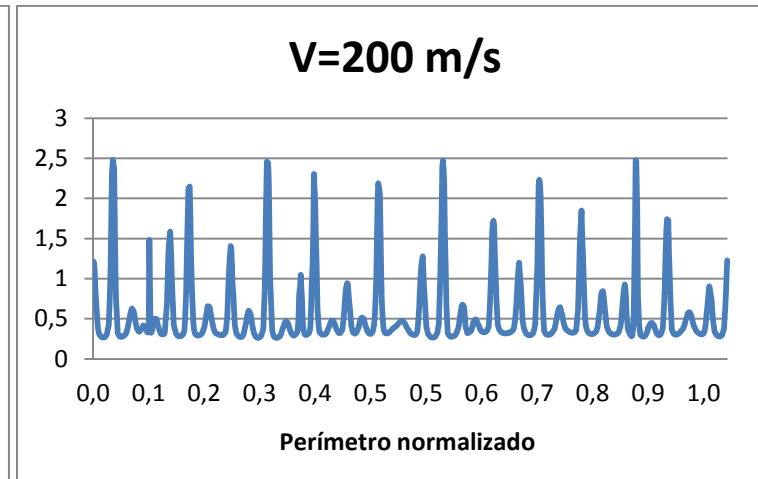


Fig. 29 Gráfica con configuración inicial a V=200m/s

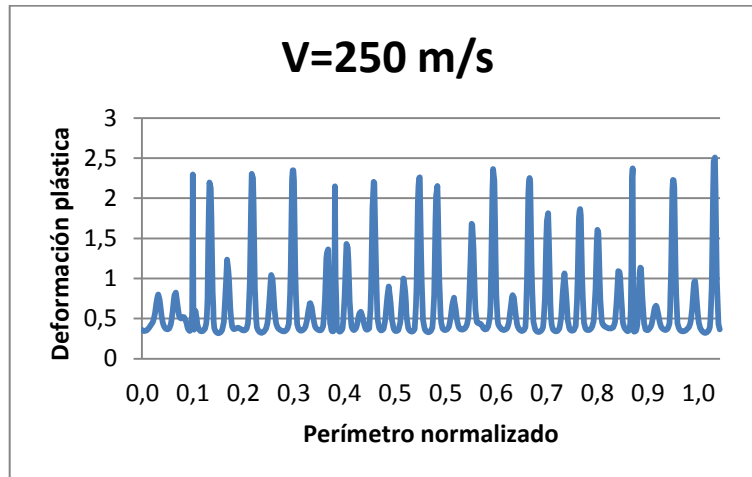


Fig. 30 Gráfica con configuración inicial a V=250m/s

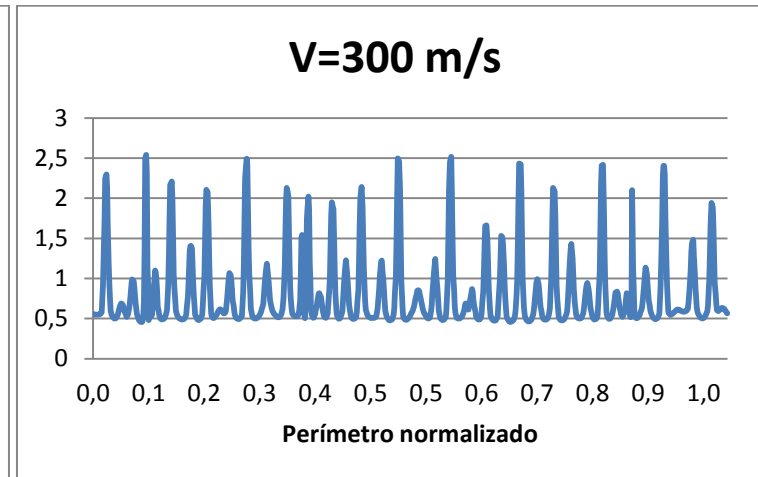


Fig. 31 Gráfica con configuración inicial a V=300m/s

Se puede concluir con este apartado diciendo que la velocidad domina los resultados. Al variar la velocidad lo que estamos haciendo es variar la inercia del objeto. Podemos concluir que la inercia es el parámetro que domina todos los efectos y resultados en este ejercicio. Con lo cual para poder analizar los resultados hay que ver qué parámetros afectan a los efectos inerciales. Para ello hay que dirigirse al desarrollo teórico expresado por *G.Vadillo et al. (2012)* en la que muestran los parámetros dependientes de la inercia.

$$K_L = \frac{\sqrt{\sigma_0/\rho_0}}{r_0\dot{\epsilon}}$$

Según esta fórmula K_L depende del nivel del flujo de tensión, σ_0 , de la densidad, ρ_0 , de la geometría del anillo, r_0 , y de la velocidad de deformación, $\dot{\epsilon}$.

Al aumentar K_L lo que provoca es que disminuyan los efectos inerciales en el anillo.

Con esta fórmula en la mano se va a ir analizando cada uno de los parámetros mencionados anteriormente. Ya se ha demostrado que el aumento de la velocidad de expansión hace que aumenten los efectos de la inercia. Vamos a ver ahora si el resto de parámetros influyen de la misma manera.

5. Discusión de resultados

En este apartado se va a tratar de mostrar la influencia de los parámetros de la fórmula expresada por *G. Vadillo et al. (2012)*.

Al tener una relación directa con la inercia, se podrá concluir que estos parámetros afectan directamente a los resultados finales y a la rotura del anillo. Se comparará todo tipo de resultados alterando dichos parámetros que puedan afectar a los efectos inerciales para poder entender el comportamiento del anillo ante dichos cambios.

5.1 Efecto de la geometría

El primer parámetro que afecta a la inercia es el de la geometría. Podemos prever cómo va a afectar este cambio ya que en la fórmula el factor de R_0 está en el denominador. Para poder variar la geometría, manteniendo la forma cuadrada de la sección, tenemos que aumentar y disminuir la longitud de la sección. En la configuración de referencia se tiene una sección cuadrada de 1mm x 1mm. En este apartado reduciremos dicha sección hasta 0.5mm x 0.5mm y posteriormente la aumentaremos hasta que sea igual a 1.5mm x 1.5mm.

Con el principal objeto de ver las diferencias de las variaciones del espesor se van a colocar las gráficas de la mejor manera posible para este fin. El objetivo de este apartado es ver con qué sección se consigue estabilizar más el material. Si se estabiliza el material quiere decir que esa variación hace que disminuya K_L y que aumenten los efectos inerciales.

Haremos el mismo procedimiento en los dos siguientes apartados y podremos comparar el efecto de todos los parámetros influyentes.

Las gráficas tendrán los mismos ejes que en casos anteriores. En el eje X de 0 a 1 el perímetro normalizado y en el eje Y de 0 a 3 la deformación plástica.

Las gráficas situadas en la parte superior y de color azul representarán la deformación del anillo con una sección menor y las graficas colocadas en la parte inferior y de color rojo representarán la deformación del anillo con sección mayor.

En la primera secuencia de gráficas se puede ver que los resultados del anillo con menor sección tienen un mayor número de estricciones y mayor número de roturas.

En la segunda secuencia de imágenes se ve que ocurre exactamente lo que hemos dicho, que aunque se produzcan más estricciones y roturas en el anillo con menor sección se puede ver que hay puntos del perímetro normalizado cuya deformación plástica es muy baja, cosa que no pasa en el anillo con mayor sección aunque tenga menor número de roturas. Eso ocurre porque al aumentar la geometría del anillo lo que estamos haciendo es estabilizar el material.

Discusión de resultados

En la tercera página de imágenes se puede apreciar los mismos efectos con mayor tamaño. Produciéndose hasta cinco veces más roturas en el anillo con menor sección que las producidas en el anillo con mayor sección.

Podemos concluir que al aumentar la sección, aumenta R_0 , disminuye K_L , el material se comporta de manera más estable, hay un mayor número de roturas y un mayor efecto inercial.

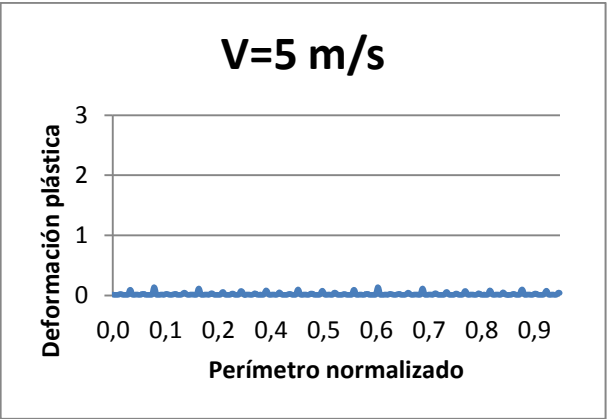


Fig. 32 Gráfica de sección menor a $V=5\text{m/s}$

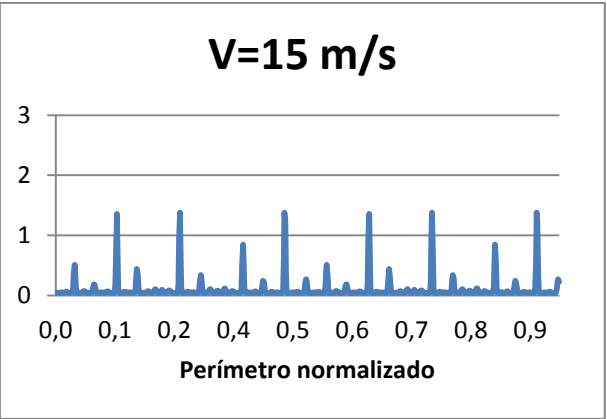


Fig. 33 Gráfica de sección menor a $V=15\text{m/s}$

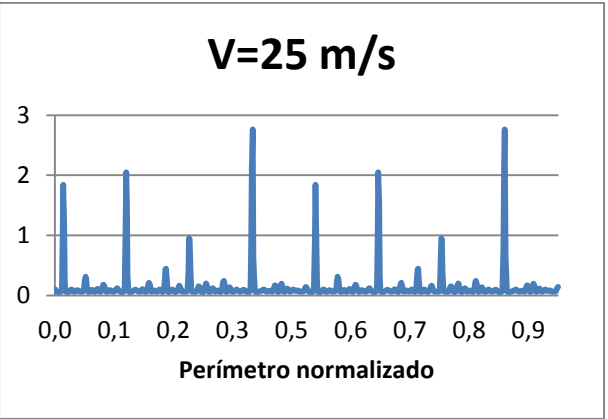


Fig. 34 Gráfica de sección menor a $V=25\text{m/s}$

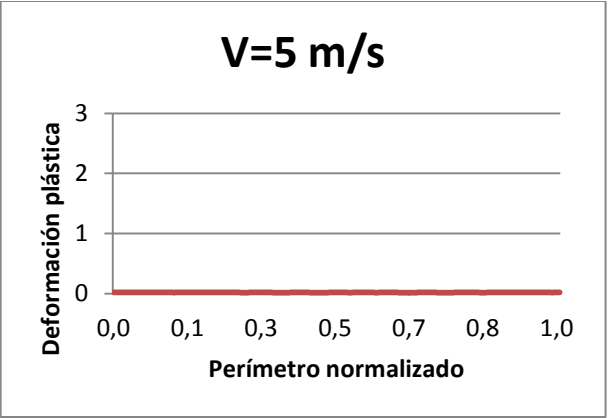


Fig. 35 Gráfica de sección mayor a $V=5\text{m/s}$

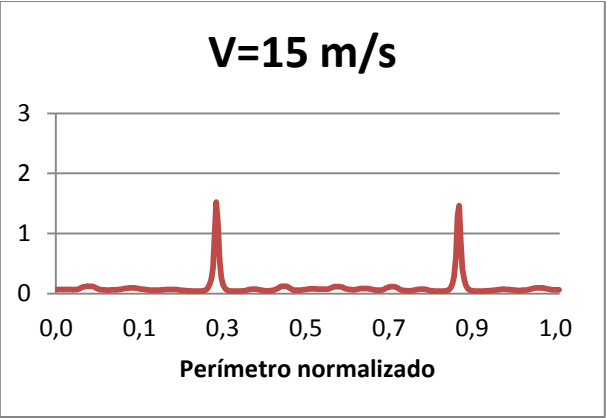


Fig. 36 Gráfica de sección mayor a $V=15\text{m/s}$

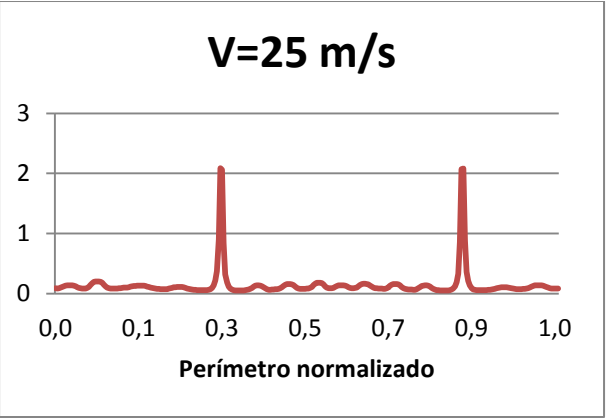


Fig. 37 Gráfica de sección mayor a $V=25\text{m/s}$

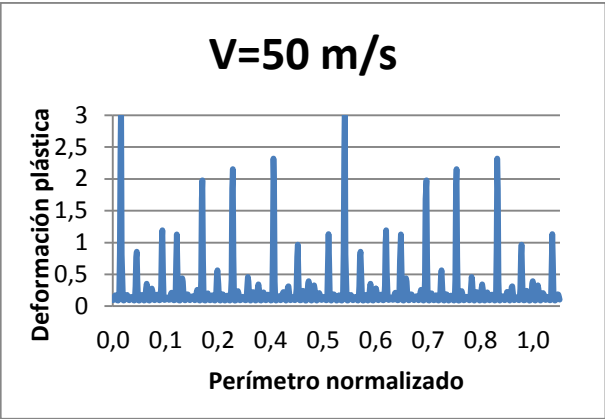


Fig. 38 Gráfica de sección menor a V=50m/s

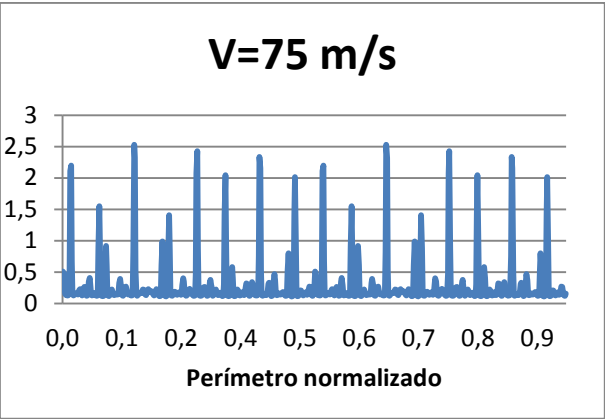


Fig. 39 Gráfica de sección menor a V=75m/s

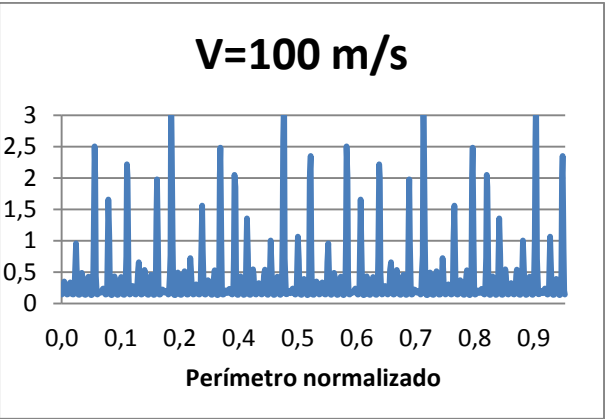


Fig. 40 Gráfica de sección menor a V=100m/s

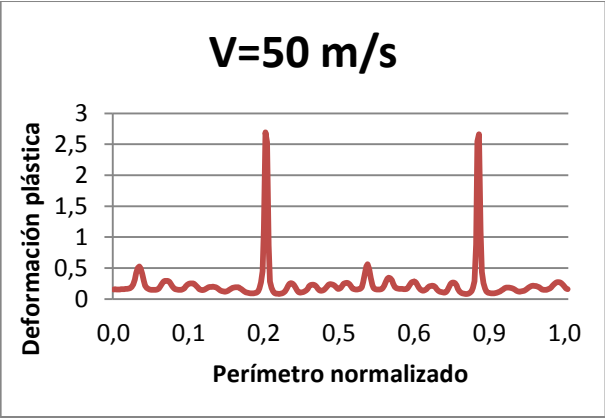


Fig. 41 Gráfica de sección mayor a V=50m/s

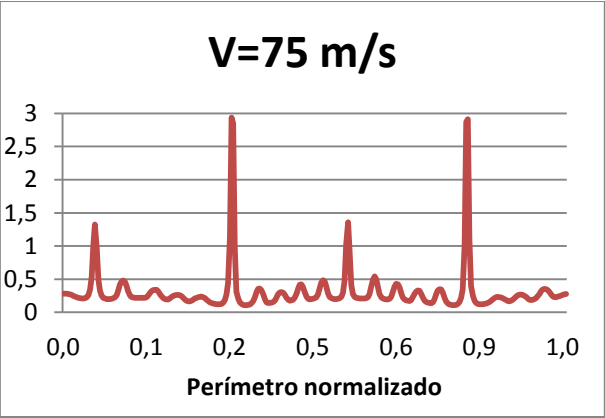


Fig. 42 Gráfica de sección mayor a V=75m/s

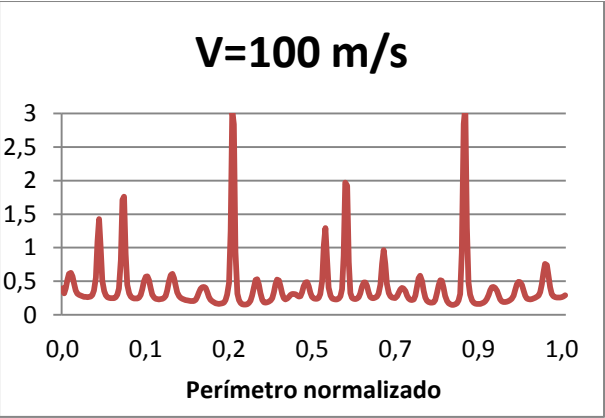


Fig. 43 Gráfica de sección mayor a V=100m/s

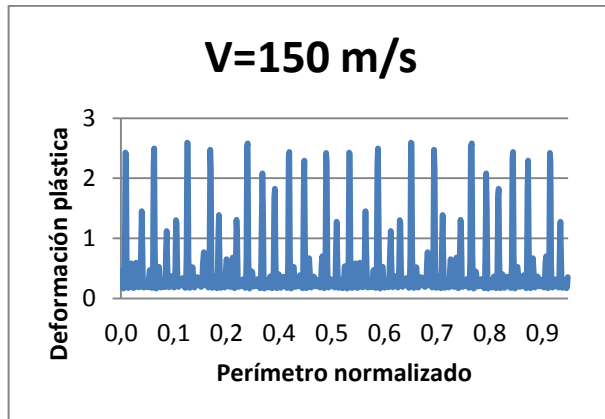


Fig. 44 Gráfica de sección menor a $V=150\text{m/s}$

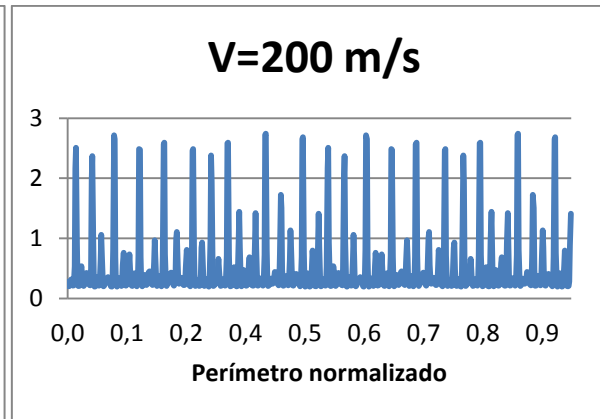


Fig. 45 Gráfica de sección menor a $V=200\text{m/s}$

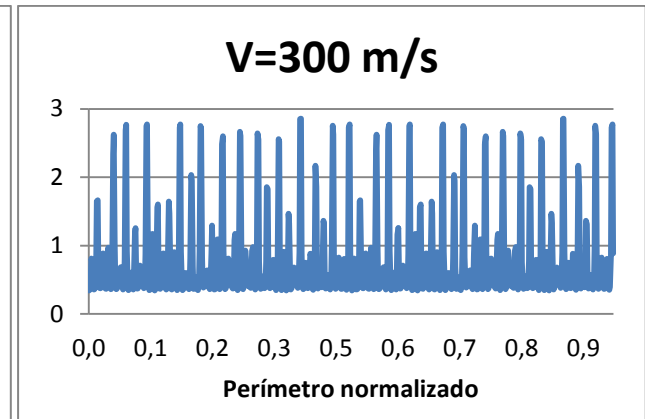


Fig. 46 Gráfica de sección menor a $V=300\text{m/s}$

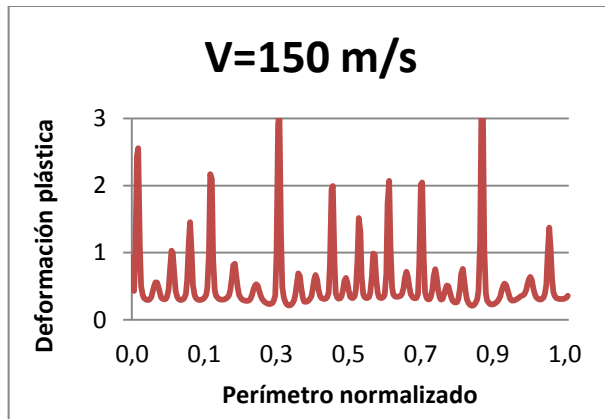


Fig. 47 Gráfica de sección mayor a $V=150\text{m/s}$

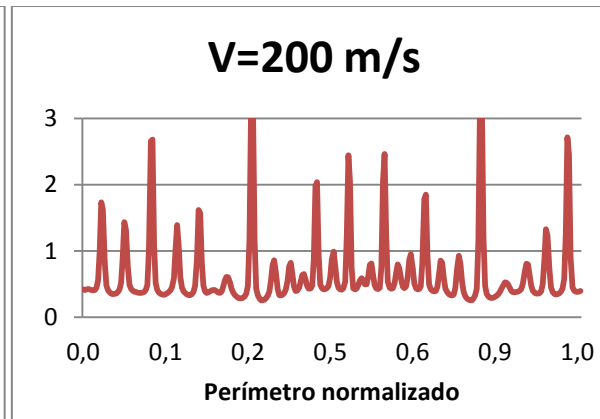


Fig. 48 Gráfica de sección mayor a $V=200\text{m/s}$

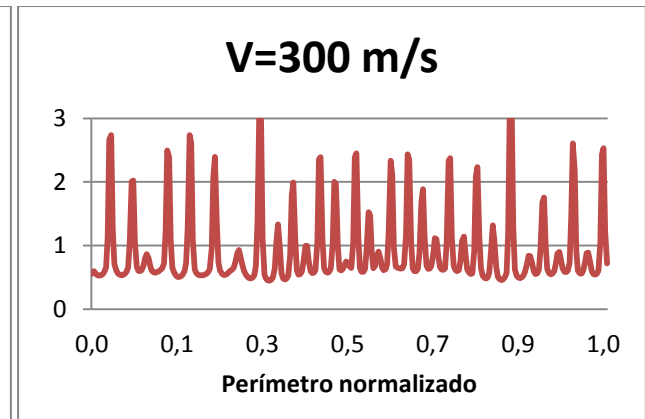


Fig. 49 Gráfica de sección mayor a $V=300\text{m/s}$

5.2 Efecto del flujo de tensión

El segundo parámetro que afecta directamente a la constante K_L es el nivel del flujo de tensión σ_0 .

Fijándonos en la fórmula de *Vadillo et al (2012)* se puede ver que el nivel del flujo de tensión es directamente proporcional a K_L . Es decir, el aumento del nivel del flujo de tensión tendría que disminuir los efectos inerciales del sólido.

Para poder comprobar esa teoría se van a mostrar una serie de gráficos en los que se alterará el nivel del flujo de tensión. Como nuestro principal objetivo, además de ver la cantidad de roturas y la estabilidad del anillo en el ejercicio, es poder comparar los resultados de este apartado con el apartado anterior se va a proceder de la misma manera que en el caso anterior.

La configuración de referencia tenía un límite elástico de 500 MPa, en este apartado se aumentará dicho valor hasta llegar a los 1000 MPa y luego se reducirá hasta los 200 MPa. De esta manera podremos comparar de manera sencilla estos resultados con los mostrados en el caso anterior. De la misma manera que en el apartado anterior se irá aumentando la velocidad de expansión desde los 5 m/s hasta los 300 m/s para ver todos los efectos producidos en el anillo.

Las gráficas que están colocadas en la parte superior y representadas de color azul tienen un nivel del flujo de tensión bajo, igual a 200 MPa. Y las que están en la parte inferior y de color rojo tendrán un nivel del flujo de tensión a alto, igual a 1000 MPa.

Las gráficas tendrán los mismos ejes que en casos anteriores. En el eje X desde 0 hasta 1 el perímetro normalizado y en el eje Y de 0 a 3 la deformación plástica.

Se tratará de explicar no sólo lo que ocurre al variar el nivel del flujo de tensión sino también poder ver como este efecto contrarresta al de la geometría.

En la primera página se puede ver como la diferencia entre ambos casos no es muy grande, el número de estricciones es parecido y el de roturas también. Esto es debido a que en la fórmula mostrada anteriormente el nivel del flujo de tensión está dentro de una raíz cuadrada y por eso reduce su efecto. Para poder ver con claridad los efectos inerciales tendremos que aumentar más la velocidad. Lo que sí que se puede ver es que para el caso de un bajo límite elástico el anillo empieza a estabilizarse. Se ve como la gráfica comienza a elevarse y todos los puntos empiezan a tener una deformación plástica diferente de cero, algo que no ocurre en el caso de un alto nivel del flujo de tensión.

En la siguiente secuencia de figuras ya se puede ver la clara diferencia de las dos simulaciones. Vemos que cuando σ tiene un valor de 200 MPa todos los puntos de la periferia del anillo toman valores muchos más altos de deformación plástica que los que toman cuando el valor es de 1000 MPa. Esto indica que el material se está estabilizando. Además de este efecto también hay que destacar que las roturas son más pronunciadas para el caso en el que el límite de tensión es mayor, 1000 MPa.

Discusión de resultados

Y en la tercera serie de imágenes se puede demostrar lo dicho anteriormente. Vemos que todos los puntos de perímetro en el caso de 200MPa tienen una deformación plástica mucho mayor, tanto es el caso que a una velocidad de 300m/s ningún punto tiene una deformación plástica menor a 1.3 mientras que en el caso en el que la tensión es igual a 1000MPa hay zonas del perímetro normalizado que tienen una deformación plástica de 0.4. Esto demuestra que al disminuir el nivel del flujo de tensión conseguimos estabilizar el anillo y que se produzcan una menor cantidad de roturas.

Para concluir se puede decir que al aumentar el nivel del flujo de tensión el material reduce su estabilidad, se producen un menor número de roturas, aumenta el factor K_L y lo más importante, se reducen los efectos inerciales en el anillo.

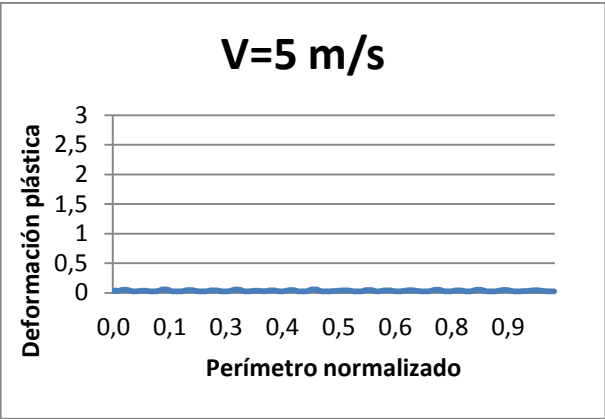


Fig. 50 Gráfica con $\sigma=200\text{MPa}$ a $V=5\text{m/s}$

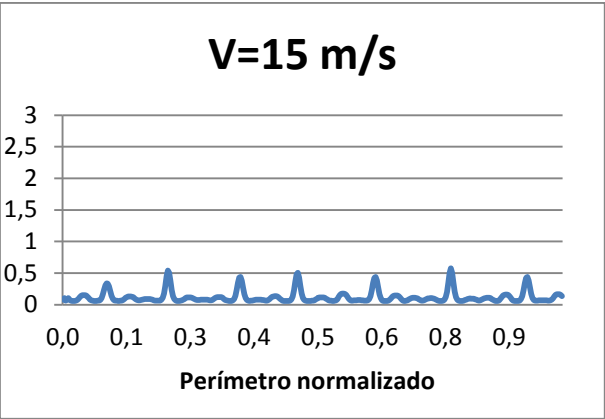


Fig. 51 Gráfica con $\sigma=200\text{MPa}$ a $V=15\text{m/s}$

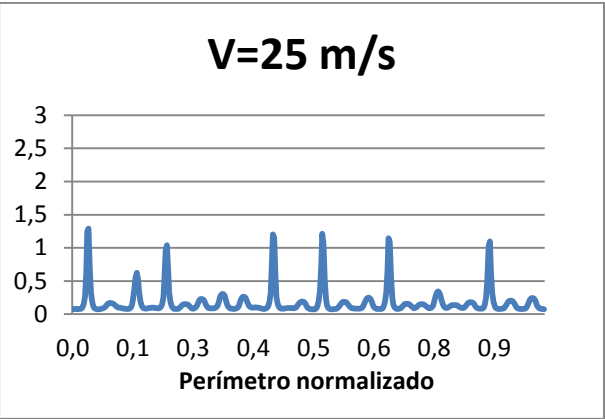


Fig. 52 Gráfica con $\sigma=200\text{MPa}$ a $V=25\text{m/s}$

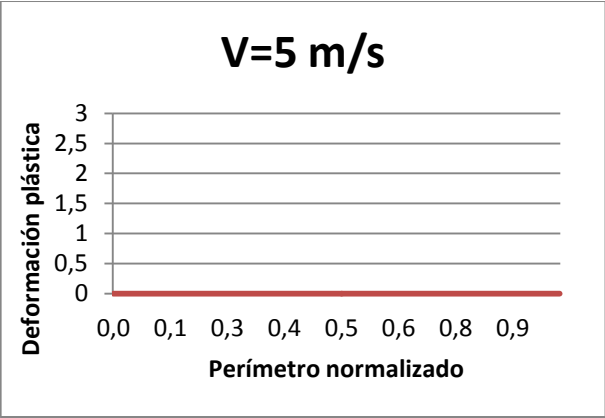


Fig. 53 Gráfica con $\sigma=1000\text{MPa}$ a $V=5\text{m/s}$

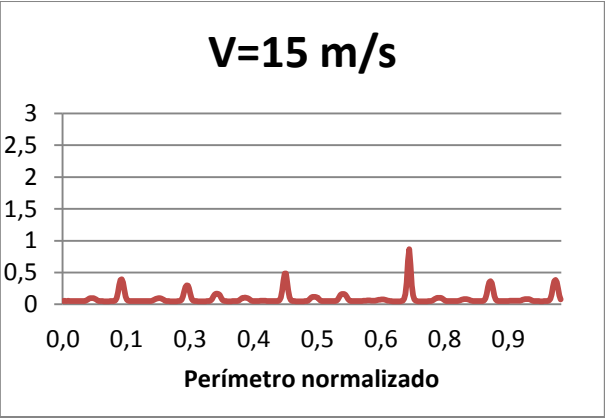


Fig. 54 Gráfica con $\sigma=1000\text{MPa}$ a $V=15\text{m/s}$

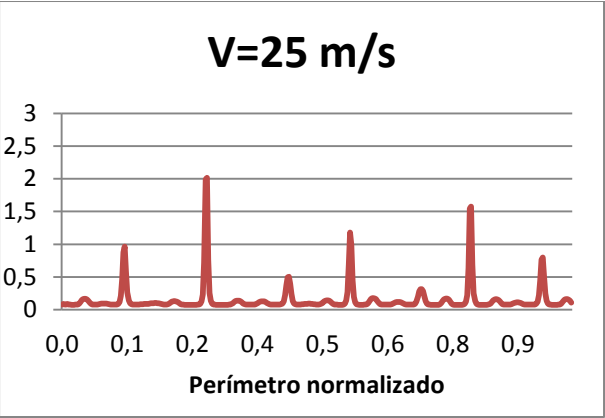


Fig. 55 Gráfica con $\sigma=1000\text{MPa}$ a $V=25\text{m/s}$

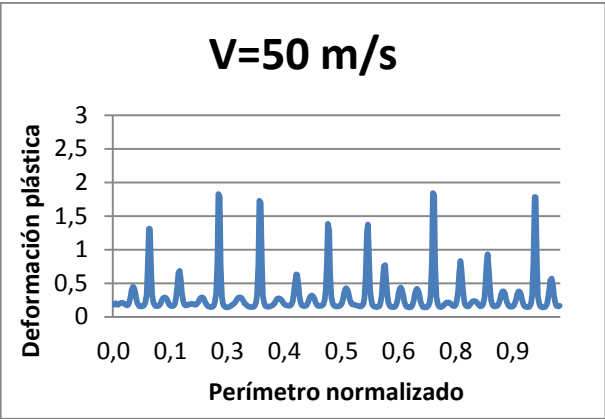


Fig. 56 Gráfica con $\sigma=200\text{MPa}$ a $V=50\text{m/s}$

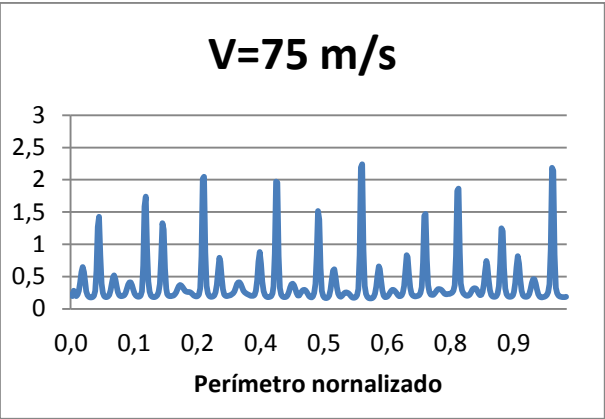


Fig. 57 Gráfica con $\sigma=200\text{MPa}$ a $V=75\text{m/s}$

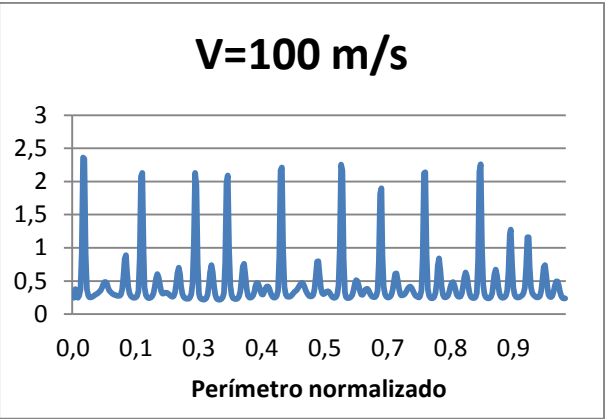


Fig. 58 Gráfica con $\sigma=200\text{MPa}$ a $V=100\text{m/s}$

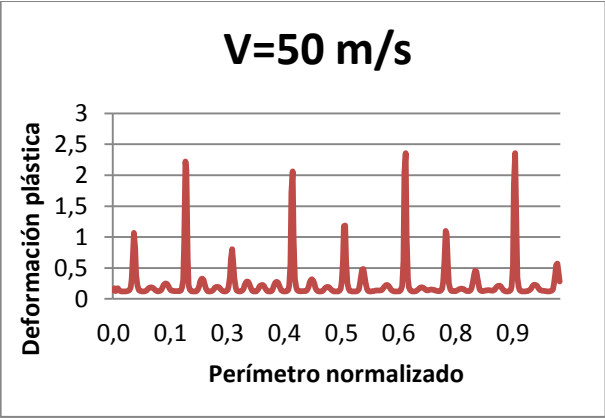


Fig. 59 Gráfica con $\sigma=1000\text{MPa}$ a $V=50\text{m/s}$

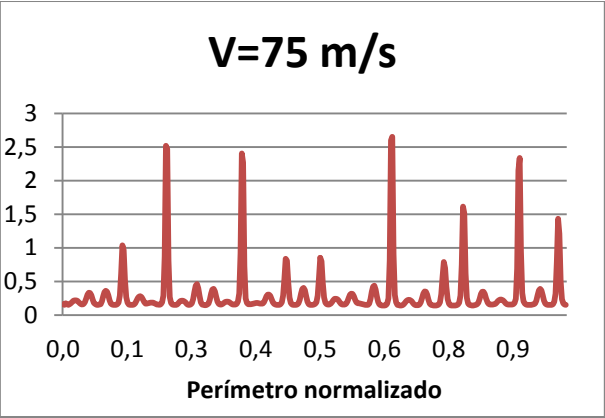


Fig. 60 Gráfica con $\sigma=1000\text{MPa}$ a $V=75\text{m/s}$

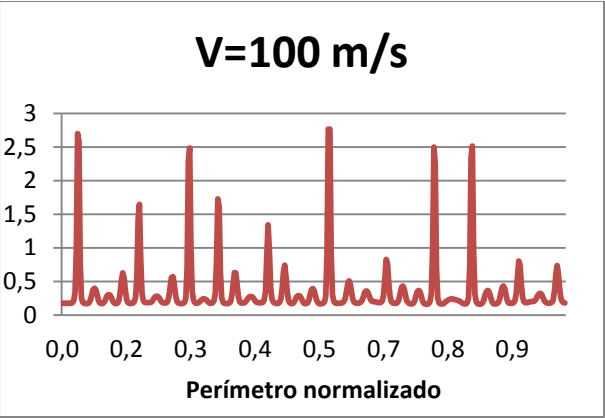


Fig. 61 Gráfica con $\sigma=1000\text{MPa}$ a $V=100\text{m/s}$

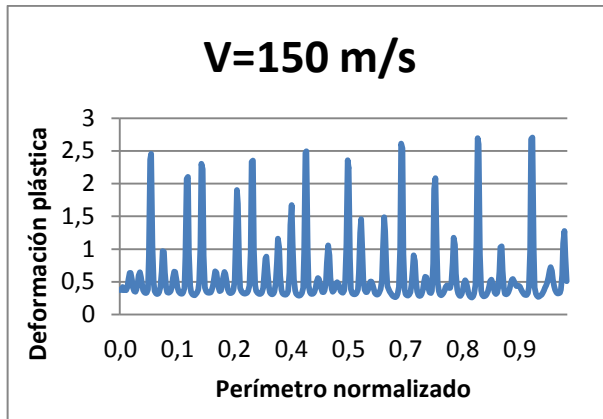


Fig. 62 Gráfica con $\sigma=200\text{MPa}$ a $V=150\text{m/s}$

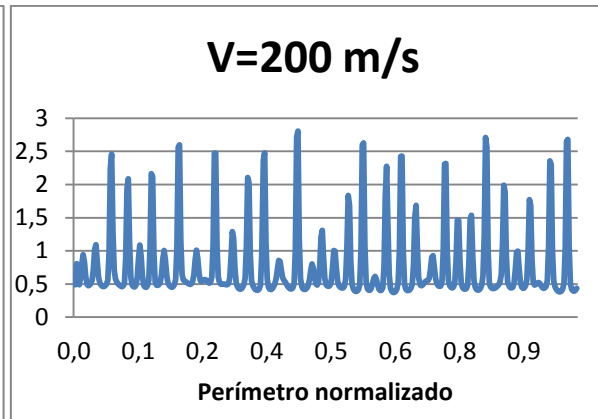


Fig. 63 Gráfica con $\sigma=200\text{MPa}$ a $V=200\text{m/s}$

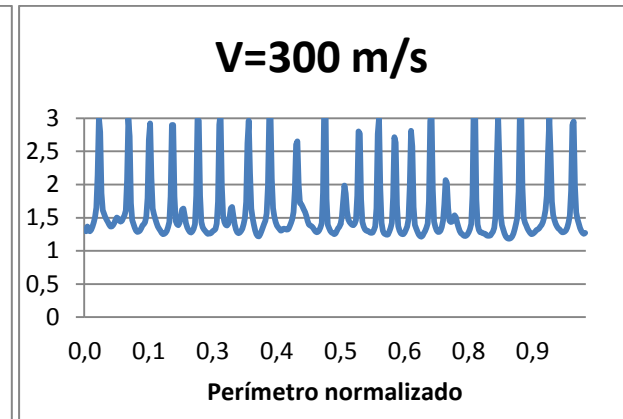


Fig. 64 Gráfica con $\sigma=200\text{MPa}$ a $V=300\text{m/s}$

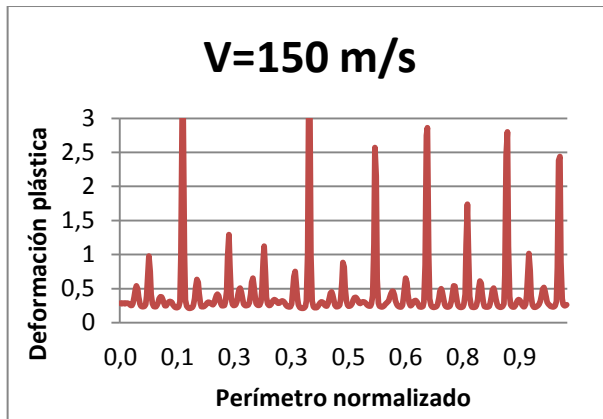


Fig. 65 Gráfica con $\sigma=1000\text{MPa}$ a $V=150\text{m/s}$

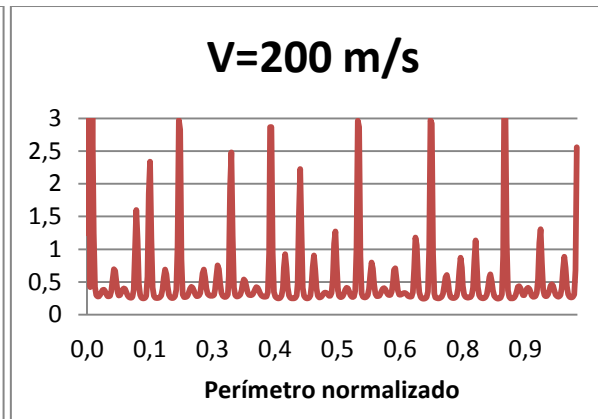


Fig. 66 Gráfica con $\sigma=1000\text{MPa}$ a $V=200\text{m/s}$

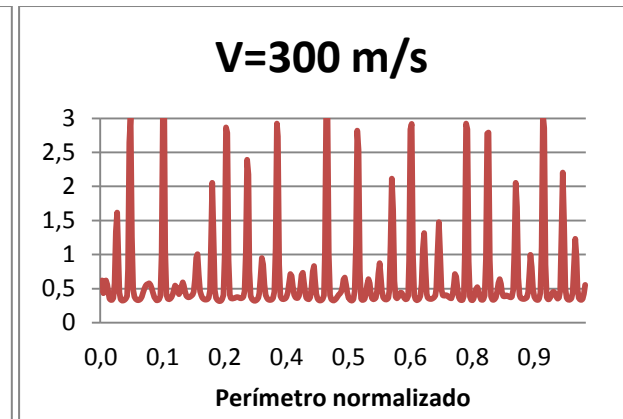


Fig. 67 Gráfica con $\sigma=1000\text{MPa}$ a $V=300\text{m/s}$

Discusión de resultados

Para poder entender con claridad la influencia del límite elástico en todos los resultados, además de variar dicho parámetro alterando la velocidad, se analizarán los resultados manteniendo la velocidad constante y variando solo el nivel del flujo de tensión. En la siguiente página se representará una sola gráfica en la que se mostrarán los resultados de los diferentes valores de tensión. De esta manera se podrá comprender con más facilidad los resultados concluidos anteriormente.

La configuración de referencia tenía un nivel de flujo de tensión de 500 MPa. Lo que se va a hacer aquí es representar cuatro casos extremos para ver de manera representativa las diferencias. Los valores de flujo de tensión representados serán de 5, 50, 100 y 1000 MPa.

Los ejes del gráfico no variarán teniendo en el eje X el perímetro normalizado y en el eje Y los valores de la deformación plástica desde 0 hasta 6.

Se puede ver con mucha facilidad en la Fig. 68 Gráfica de variación del límite elástico manteniendo el resto de parámetros con $V=200$ que ante un límite elástico tremendamente bajo como es el de 5MPa todo el perímetro del anillo consigue estabilizarse con valores de deformación plástica muy altos. Y según vamos aumentando el valor del flujo de tensión se puede ver como empieza a desestabilizarse y aparecen roturas con valores de deformación plástica más bajos.

Como conclusión decir que para un nivel del flujo de tensión tan bajo se estabiliza la deformación plástica en valores muy altos produciéndose mayor cantidad de roturas y según se va aumentando dicho parámetro a partir de los 100 MPa empieza a reducirse ese número de roturas y a generarse menos estricciones.

En este caso se ve con facilidad que al disminuir el nivel del flujo de tensión los efectos inerciales producidos en el anillo aumentan y se consigue una deformación plástica mayor.

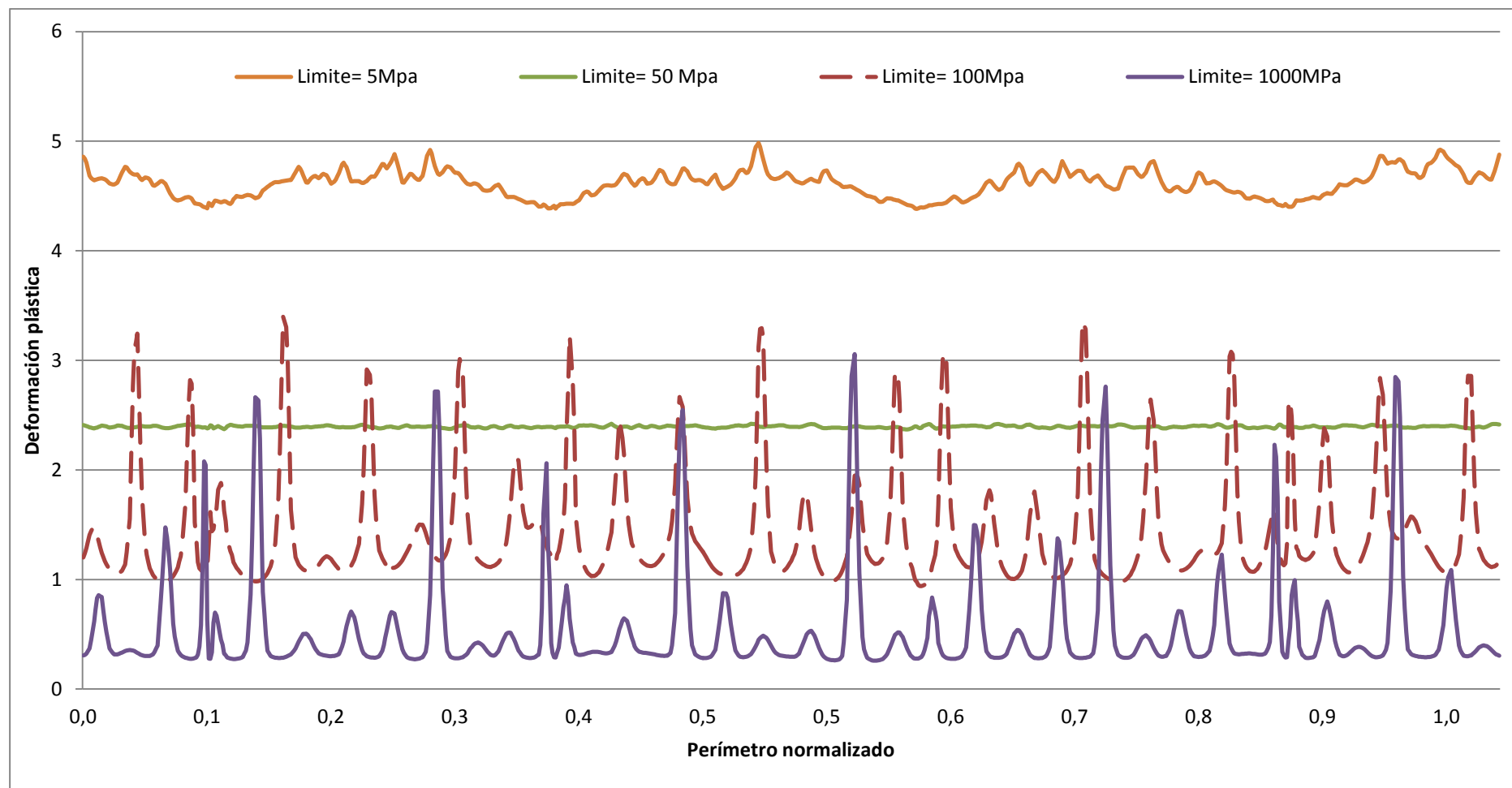


Fig. 68 Gráfica de variación del límite elástico manteniendo el resto de parámetros con $V=200$ m/s

5.3 Efecto de la densidad

El último parámetro que afecta directamente a los efectos de la inercia es la densidad. Para continuar con el proceso seguido hasta ahora nos fijaremos otra vez en la fórmula expresada de *Vadillo et al. (2012)*.

La densidad se encuentra en el divisor en la fórmula. Con lo cual los resultados de este último análisis deberían ser completamente opuestos a los obtenidos con la variación del nivel del flujo de tensión.

En este apartado se mostrará, de igual manera que en el apartado anterior, una sola gráfica demostrando la influencia y los resultados obtenidos con su variación. De este modo seremos capaces de comparar ambas gráficas.

La densidad de referencia era de 7850 kg/m^3 . Lo que se va a hacer en este apartado es disminuir dicha densidad hasta 100 kg/m^3 y luego aumentarla a 10.000 y a 100.000 kg/m^3 . En el gráfico seguiremos teniendo en el eje X el perímetro normalizado y en el eje Y los valores de la deformación plástica de 0 a 4.

Se puede apreciar en la Fig. 69, que para una densidad muy baja, como es de 100 kg/m^3 , aparecen diferentes roturas y restricciones además de tener todos sus puntos del perímetro unos valores bajos de deformación plástica.

Para una densidad de 10.000 kg/m^3 , que es una densidad más normal y parecida a la utilizada en la configuración de referencia, aparecen una serie de estricciones y deformaciones a lo largo del anillo y todos los puntos del anillo para este caso tienen una mayor deformación plástica que la que tenían en la primera situación.

Pero como realmente se ve la diferencia es aumentando dicha densidad hasta los 100.000 kg/m^3 , que es lo que se ha hecho en el último caso. Al aumentar tanto la densidad, algo que a priori no es real y que sólo nos sirve para comprender su efecto, se puede ver que el anillo se estabilizaría con unos valores parecidos y muy altos de deformación plástica. Esta estabilidad causada por el aumento de la densidad es debida al aumento de los efectos de la inercia al disminuir KL.

Podemos concluir en este apartado que de cara a efectos de la inercia, la densidad y el nivel del flujo de tensión afectan de forma completamente opuesta. El efecto conseguido al aumentar la densidad se obtiene disminuyendo el límite elástico y viceversa.

Al aumentar la densidad se consigue elevar la estabilidad, mayores valores de deformación plástica, aparece un mayor número de roturas y aumentan los efectos inerciales en el anillo.

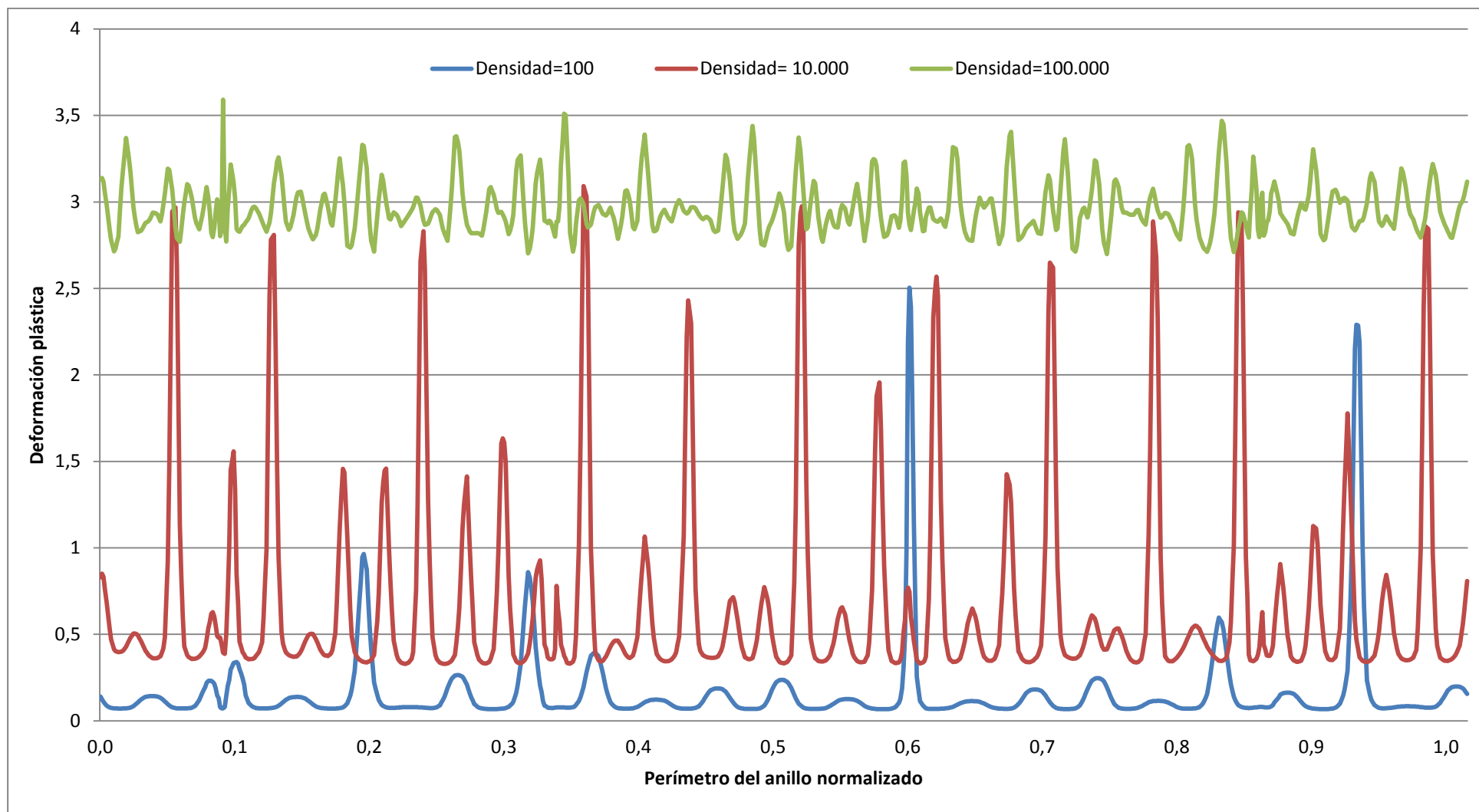


Fig. 69 Gráfica de variación de la densidad manteniendo el resto de parámetros con $V=200$

6. Conclusiones

El presente trabajo de fin de grado ha consistido en llevar a cabo una serie de simulaciones numéricas con el objeto de comprobar la influencia de los efectos inerciales en procesos de deformación de anillos sometidos a una expansión radial. Una vez comprobada el dominio de la velocidad en el proceso, se procedió a seguir la fórmula expresada por *Vadillo et al.(2012)*. Se ha podido ver que los aspectos y parámetros más importantes son:

- La velocidad de expansión: Es el parámetro que más afecta a todos los efectos finales. El aumento de la velocidad hace que el material se comporte de manera más estable, con una mayor deformación plástica y un mayor número de roturas. Esto ocurre porque la velocidad de expansión domina los efectos inerciales del material.
- La geometría: El aumento de la sección del anillo hace que éste se comporte de manera más estable frente a la expansión, produciéndose mayor cantidad de roturas. Los efectos inerciales aumentan al aumentar el área de la sección.
- El nivel del flujo de tensión: Con el aumento del nivel del flujo de tensión se consigue un material menos estable y con menos cantidad de roturas. Esto provoca una disminución de los efectos inerciales.
- La densidad: La variación de este parámetro provoca los efectos contrarios que en el caso anterior. Ya que en la fórmula antes expresada son inversamente proporcionales.

Se va a mostrar una tabla resumen con todos los efectos producidos al variar estos parámetros.

Tabla 3 Tabla resumen de los efectos producidos

Parámetro	Variación	Estabilidad	Valor deformación plástica	Roturas	KL	Efectos inerciales
Geometría	Disminuye	-	-	-	+	-
	Aumenta	+	+	+	-	+
Nivel del flujo de tensión	Disminuye	+	+	+	-	+
	Aumenta	-	-	-	+	-
Densidad	Disminuye	-	-	-	+	-
	Aumenta	+	+	+	-	+

7. Trabajos futuros

El estudio sobre las inestabilidades producidas por procesos de expansión radial no ha concluido. Existen varias labores por hacer. Algunas de las líneas que se pueden abordar como continuación de este trabajo de fin de grado son:

- Tubos: El objeto utilizado en todas nuestras simulaciones ha sido un anillo. Sería de gran interés centrar estas mismas investigaciones con estructuras tubulares y ser capaces de comparar como varían los resultados.
- Sección circular: Toda nuestra investigación se ha centrado en el estudio de anillos con sección cuadrada. Un posible trabajo futuro sería completar la misma serie de simulaciones con anillos de sección circular.
- Todo tipo de materiales: La modificación del tipo de material en todas nuestras simulaciones sería otro punto a estudiar.

8. Referencias

- [1] A.Rusinek, R.Zaera, *Finite element simulation of steel ring fragmentation under radial expansión.*
- [2] C.Vela, J.A.Rodriguez-Martínez, A.Rusinek, *Analysis on the formation of plastic instabilities in dinamically expanded copper rings.*
- [3] G.vadillo, J.A.Rodriguez-Martínez, J.Fernández-Sáez, *On the interplay between strain rate and strain rate sensitivity on flow localization in the dynamic expansión of ductile rings*
- [4] Grady DE, Brenson DA (1983) *Fragmentation of metal rings by electromagnetic loading. Exp Mech* 12:393-400
- [5] Gourdin WH (1989) *Analysis and assessment of electromagnetic ring expansion as a high-strain-rate test. J Appl Phys* 65:411-422
- [6] Guduru, P. R., Reund, L. B. 2002. *The dynamics of multiple neck formation and fragmentation n high rate extension of ductile materials. International Journal of Solids and Structures* 39: 5615-5632.
- [7] H.Zhang, K.Ravi-Chandar, *On the dynamics of necking and fragmentation.*
- [8] Han JB, Tvergaard V (1995) *Effect of inertia on the necking behavior of ring specimens under rapid radial expansion. Eur J mech-A-Solid* 14: 287-307
- [9] Hutchinson, J. W., Neale, K. W., 1997. *Influence of strain rate sensitivity on necking under uniaxial tension. Acta Metallurgica* 25: 839-846.
- [10] Mott NF (1947) *Fragmentation of shell cases. Proc Roy Soc Lond, Series A* 189: 300-308
- [11] Niordson FI (1965) *A unit for testing materials at high strain rates. Expo Mech* 5:23-32
- [12] Pandolfi A, Krysl P, Ortiz M (1999) *Finite element simulation of ring expansion and fragmentation: the capturing of length and the time scales through cohesive models of fragture. Int J Frac* 95:279-297
- [13] Tvergaard V (1993) *Necking in tensile bars with rectangular cross-section. Comput Meth Apply Mech Eng* 103:273-290. doi: 10.1016/0045-7825(93)90049-4
- [14] Vela, C., Rodríguez-Martínez, J. A., Rusinek, A., 2011. *FE analysis on the formation of plastic instabilities in dyamically expanded copper rings. Engineering Transactions* 59: 1-23.
- [15] Von Karman T, Duwez P (1950) *The propagation of plastic deformation in solids. J Appl Phys* 21:987-994
- [16] ABAQUS/Explicit v6.11, *User's Manual*, ABAQUS Inc., Richmond USA